

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МІНАКОВ АНТОН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 620.179.14:539.4

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО
СТАНУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ**

Спеціальність 05.03.06 - зварювання та споріднені процеси і технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А.С.Мінаков

Науковий керівник Фомічов Сергій Константинович, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2018

АНОТАЦІЯ

Мінаков А.С. Експериментальне визначення напружено-деформованого стану зварних з'єднань електромагнітним методом – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - зварювання та споріднені процеси і технології - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", МОН України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена вдосконаленню електромагнітного методу для оцінювання напружень та деформацій у пластично-деформованих зонах зварних конструкцій. Розглядалось два випадки: залишкові зварювальні деформації та напруження у пластичній зоні зварних з'єднань (пластичні деформації стиснення і напруження розтягу) і пластичні деформації розтягу та напруження розтягу у інших ділянках зварних конструкцій.

Основний парк технологічного обладнання в Україні складають зварні конструкції із низьковуглецевих та низьколегованих сталей. Питання економічної безпеки України залежить від продовження експлуатації існуючого обладнання. Основними факторами працездатності конструкцій є властивості матеріалу, наявність дефектів, напруження та деформації. Знання про напружено-деформований стан зварних конструкцій є важливим чинником їх успішної експлуатації. Роботи про дослідження напруженого стану зварних конструкцій ведуться давно, однак визначення напружень в умовах наявності пластичних деформацій є мало дослідженою проблемою. Відомо, що залишкові пластичні деформації є причиною залишкових зварювальних напружень. Експериментальних методів визначення їх величин дуже бракує, що значно ускладнює оцінку технічного стану інфраструктурних об'єктів.

Останнім часом з'явилося багато комплексних методів, коли одночасно застосовують декілька електромагнітних способів визначення. Таке поєднання є досить вдалим, при цьому переваги різних методів компенсують їх недоліки.

На основі аналізу літератури запропоновано використати для вирішення завдань роботи два методи: магнітоанізотропний метод та метод коерцитивної сили. Останній метод запропоновано модернізувати для роботи в змінних полях, що дозволить сканувати зварні конструкції. Дослідження проведені на зразках із відомими пластичними деформаціями та напруженнями.

Проведено експериментальні дослідження впливу пластичних деформацій та напружень плоских зразків сталі 09Г2С товщиною 4 мм на гармонічні складові сигналу магнітоанізотропного перетворювача та параметри петлі магнітного гістерезису.

Пластичні деформації стиснення створювали шляхом нагрівання частини плоского зразка газовим пальником до температур 650-750 °С із наступною деформацією. На спеціально розробленій машині із використанням ручного гідравлічного домкрату створювали пластичні деформації розтягу. Напруження розтягу наводили за допомогою установки для чистого вигину плоских зразків.

На основі експериментальних досліджень доведено, що напружено-деформований стан пластичної зони зварних з'єднань та ділянок із пластичними деформаціями розтягу може бути кількісно оцінено шляхом сумісного гармонічного аналізу сигналу 4-х полюсного магнітоанізотропного перетворювача та параметрів петлі магнітного гістерезису.

Запропоновано для визначення ступеню пластичного деформування стиснення у пластичній зоні зварних з'єднань електромагнітним методом доцільно застосовувати параметри петлі магнітного гістерезису: половину перетину по осі індукції (В) та напівширину (Hmax) по осі поля. А для визначення напружень у пластичній зоні зварних з'єднань електромагнітним методом доцільно застосовувати

параметри: амплітуди першої, третьої та шостої гармонік магнітоанізотропного перетворювача.

Запропоновано для визначення ступеню пластичного розтягу у зварних конструкціях застосовувати параметр напіввисоту по осі індукції (B_{\max}) петлі магнітного гістерезису перетворювача параметрів перемагнічування. А для визначення напружень розтягу у цих ділянках доцільно застосовувати фазу першої гармоніки сигналу магнітоанізотропного перетворювача.

Запропоновано новий комбінований перетворювач у двох варіантах для визначення гармонійних складових сигналу магнітоанізотропного перетворювача та параметрів петлі магнітного гістерезису. У першому варіанті намагнічуючий електромагніт доповнено обмотками намагнічування та вимірювання по методу параметрів перемагнічування. Для сканування конструкції по магнітоанізотропному методу використовується напрям 45° відносно намагнічуючого електромагніта, а для сканування по методу параметрів перемагнічування – у напрямі намагнічуючого електромагніта. В другому варіанті магнітоанізотропний перетворювач доповнено незалежним осердям із обмоткою намагнічування по методу параметрів перемагнічування. Таке рішення дозволяє не змінювати напрям сканування зварних конструкцій магнітоанізотропним методом та методом параметрів перемагнічування. При цьому додаткове осердя збільшує базу вимірювання перетворювача. Патент на корисну модель отримано за технічне рішення такого комбінованого перетворювача.

Розроблено прилад MESTR-501 для визначення напружено-деформованого стану електромагнітним методом на натурних зварних конструкціях. Він складається із комбінованого перетворювача, модуля вимірювання та обробки сигналів, промислового комп'ютеру, активного монітору, акумуляторного блоку живлення. Прилад компонується у корпусі, який може приймати два положення: робоче і транспортування. Таке рішення дозволяє переносити прилад у захищеному вигляді (дисплей повернуто на 180°). У робочому положенні корпус приладу має можливість

кріпитися на торсі робітника (оператора) завдяки пасам безпеки. Це дозволяє вивільнити руки оператора для можливості маніпулювання перетворювачем і утримання за елементи конструкції. Отримані дані оброблюються на місці в промисловому комп'ютері, зберігаються і виводяться на сенсорний екран. Корпус приладу виконано з вуглецевого композиту, що зменшує вагу приладу та збільшує його стійкість до ударів об елементи зварних конструкцій.

При практичній перевірці працездатності приладу під час виконання теми «Експериментальне дослідження напружень в зварних секціях залізнично-автомобільного мосту під час монтажу шляхом насування його через р. Дніпро», проводили дослідження напружень та деформацій у вертикальних стінках зварних секціях мосту (прогонової споруди). Визначення напружень проводили у місцях до переكاتочного пристрою, на ньому і за ним. Для цього перетворювач доповнили спеціальним магнітним кріпленням. Визначення напружень у зварних секціях прогонової споруди дозволили проводити оперативні дії для вирівнювання напружень у всіх стінках та провести успішне насування її із стапелю на опори 106 м).

Також, при практичній перевірці працездатності приладу під час виконання теми «Оцінка напруженого стану судноперевантажувача СП-7.3», проводили дослідження напружень та деформацій в зварних секціях перевантажувача. Суднонавантажувач експлуатувався 30 років в умовах морського клімату, що спричинило корозію елементів конструкції. Ставилось завдання – дослідити напружено-деформований стан та зробити висновок щодо можливості подальшого експлуатування суднонавантажувача.

Впроваджено результати роботи також і в учбовому процесі.

Ключові слова: пластичні деформації, напруження, залишкові зварні деформації, залишкові зварні напруження, зварні конструкції, магнітоанізотропний перетворювач, петля магнітного гістерезису, гармоніки, пластична зона зварних з'єднань.

Список публікацій здобувача:

1. Фомичев С.К. Автономная система мониторинга механических напряжений магистральных трубопроводов с использованием возможностей GSM связи/ С.К. Фомичев, С.Н. Минаков, М.А. Яременко, С.В. Михалко, А.В. Данильчик, А.С. Минаков //Техн. диагностика и неразруш. контроль. - 2008. - №1. – С. 9-12.
2. Фомичев С.К. Определение силовых воздействий на трубопровод по анализу эпюр распределения продольных напряжений / С.К. Фомичев, С.Н. Минаков, С.В. Михалко, М.А. Яременко, А.С. Минаков. //Техн. диагностика и неразруш. контроль. - 2009. - №2. – С. 11-14.
3. Фомичев С.К. Сбор, накопление и визуализация данных мониторинга напряженного состояния магистральных трубопроводов/ С.К. Фомичев, А.Е. Пирумов, С.Н. Минаков, А.С. Минаков, А.В. Данильчик, С.В. Михалко, М.А. Яременко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, К., 2012, № 1, С. 49-52.
4. Фомичев С.К. Обработка данных в системе мониторинга напряженного состояния магистральных трубопроводов / С.К. Фомичев, А.Е. Пирумов, С.Н. Минаков, А.С. Минаков, О.Л. Бабенко, В.А. Верпета, А.И. Евтухов // Технологические системы. – 2012. – №2(59). С.81-84.
5. MONITORING OF TECHNICAL STATE OF TECHNOGENIC UNSAFE PIPELINES /S. Fomichov, S. Minakov, A. Minakov, A. Pirumov, M. Shevchenko, Ie. Chvertko, O. Vovk // Наукоємні технології, № 2 (34), 2017, С.171-177.
6. Bastun Vladimir Monitoring of the technical state of a linear part of main pipelines by nondestructive express control methods / Vladimir Bastun, Elena Bespalova, Galina Urusova, Anton Minakov// Journal of Control Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 2, April 2014, Pages 141-146. (*іноземне видання*)
7. Pirumov Andriy Application of Reverse Magnetization Method of Evaluating Stresses in Welded Structures / Andriy Pirumov, Mykola Shvevchenko, Anton Minakov,

Sergiy Minakov, Yevgenia Chvertko // Journal of Materials Science and Technology (Bulgary) 2015, Vol. 23, No. 4, pp. 295–302. *(іноземне видання)*

8. Патент на корисну модель 100379 України, МПК G01L1/12, G01N27/72. Спосіб комплексного електромагнітного контролю структурного і напружено-деформованого стану феромагнітних матеріалів / В.М. Учанін, О.П. Осташ, С.М. Мінаков, Г.Я.Безлюдько, А.С.Мінаков - № у 2015 00420; Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

9. Патент на корисну модель України. МПК G01L1/12, G01N 27/72, G01R33/00 № UA 100405 U. Електромагнітний перетворювач для комплексного контролю структурного і напружено-деформованого стану матеріалу конструкцій із феромагнітних сталей / В.М. Учанін, С.М. Мінаков, А.С. Мінаков, М.В. Сидоренко. Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

10. Патент на корисну модель України. МПК E01D 21/06, G01N 27/83 № UA 116454 U. Спосіб поздовжнього насування пролітної конструкції під час будівництва мостів / В.М. Учанін, С.К. Фомичов, С.М. Мінаков, А.С. Мінаков, Б.О. Бобін. Опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.

11. Uchanin V. Elektromagnetyczne metody wyznaczania stanu naprezenia elementov konstrukcij ze staliferromagnetycznych / V. Uchanin, S. Minakov, A. Minakov // XXI Seminarum “Nieniszczace badania materialow”, Zakopane, 18-20 marca, 2015.

12. Evaluating of Stresses in Welded Structures by means of Reverse Magnetization Method/ Andriy Pirumov, Mykola Shhevchenko, Anton Minakov, Sergiy Minakov, Yevgenia Chvertko, Maksym Ziberov // POSMEC, 2016, Uberlandia. Anais do POSMEC 2016 Simposio do Programa de Pos - Graduacao em Engenharia Mecanica, 2016, P.1-5

13. Пірумов А.Є. Система моніторингу технічного стану магістральних трубопроводів для підвищення екологічної безпеки / Пірумов А.Є., Шевченко М.В., Чвертко Є.П., Мінаков А.С., Мінаков С.М.// IX Міжнародна науково-тех-нічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина», Київ, 8 грудня 2016 р., С. 31

14. Шмигельський С.В. Визначення пластично-деформованої ділянки зварних конструкцій по сигналу магнітоанізотропного перетворювача/ С.В. Шмигельський, А.С. Мінаков, А.Є. Пірумов, М.В. Шевченко, С.М. Мінаков // Досконалість зварювання – комплексний підхід: тези доп. X Всеукр. наук.-техн. конф. / Україна, Київ, 26 травня 2016 р. – К. НТУУ «КПІ», 2016. – 24с.

15. Шмигельський С.В. Компенсація дебалансу магнітоанізотропного перетворювача / С.В. Шмигельський, А.С. Мінаков, А.Є. Пірумов, М.В. Шевченко, С.М. Мінаков // Досконалість зварювання – комплексний підхід: тези доп. X Всеукр. наук.-техн. конф. / Україна, Київ, 26 травня 2016 р. – К. НТУУ «КПІ», 2016. – 24с.

16. Прохоренко В.М. Кріплення магнітоанізотропних перетворювачів на магістральних трубопроводах/ В.М. Прохоренко, А.С. Мінаков // Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали другої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників: - Київ, 4-6 березня 2009 , С. 96-97.

17. Прохоренко В.М. Моніторинг напруженого стану магістральних трубопроводів із використанням GSM зв'язку/ В.М. Прохоренко, А.С. Мінаков //Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали третьої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників: - Київ, 31 березня – 2 квітня 2010, С. 60-61.

18. Мінаков А.С. Багатопараметровий магнітний контроль напружено-деформованого стану зварних конструкцій\ А.С. Мінаков, А.Є. Пірумов, М.В. Шевченко, С.М. Мінаков, С.В. Шмигельський // Зварювання та споріднені процеси і технології: Матеріали восьмої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників: - К.: НТУУ „КПІ”, «МП Леся», 2015. – С. 24.

19. Фомичев С.К. Дослідження взаємозв'язку коерцитивної сили із ступенем пластичного деформування феромагнітних сталей/ С.К. Фомічов, С.М. Мінаков , А.С. Мінаков // Четверта Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція

студентів, аспірантів та наукових співробітників: «Зварювання та споріднені процеси і технології», Київ, 31 березня – 2 квітня 2010, С. 62-63.

20. Мінаков А.С. Моніторинг напруженого стану магістральних трубопроводів із використанням GSM зв'язку/А.С. Мінаков, О.В. Данильчик //V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів "Зварювання та суміжні технології": Тези доповідей. – К.: ІЕЗ ім. Є.О.Патона, НАНУ.– 2009.– С.206.

21. Прохоренко В.М. Експериментальне дослідження напружень в зварних секціях залізнично-автомобільного мосту під час монтажу шляхом насунання його через р. Дніпро / В.М. Прохоренко, А.С. Мінаков, Б.О. Бобін // П'ята Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників: «Зварювання та споріднені процеси і технології», Київ, 18 -20 квітня 2012, С. 77-78

22. Фомічов С.К. Визначення коерцитивної сили за допомогою магнітоанізотропного перетворювача/ С.К. Фомічов, А.С. Мінаков // Шоста Всеукраїнська науково-технічна: «Досконалість зварювання – комплексний підхід», Київ, 24 -25 квітня 2012, С. 77-78

23. Пірумов А.Є. Оцінка величини пластичної деформації за допомогою параметрів перемагнічування / Пірумов А.Є., Шевченко М.В, Мінаков А.С., Мінаков С.М.// Сьома Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників: «Зварювання та споріднені процеси і технології», Київ, 16 травня 2013, С. 4

24. Пірумов А.Є. Дослідження впливу величини пластичної деформації та напружень на параметри шумів Баркгаузена / Пірумов А.Є., Шевченко М.В, Мінаков А.С., Мінаков С.М.// Восьма Всеукраїнська науково-технічна: «Досконалість зварювання – комплексний підхід », Київ, 20 травня 2014

25. Пірумов А.Є. Дослідження впливу величини пластичної деформації та напружень на параметри перемагнічування / Пірумов А.Є., Шевченко М.В, Мінаков А.С., Мінаков С.М.// Сьома Всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція

студентів, аспірантів та наукових співробітників: «Зварювання та споріднені процеси і технології», Київ, 14-16 травня 2014, С. 4

ANNOTATION

Minakov A.S. Experimental determination of the stress-strain state of welded joints by electromagnetic method. – Manuscript.

The thesis for a candidate of technical sciences degree in speciality 05.03.06-welding and related processes and technologies. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute the name of Igor Sikorsky”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, – 2018.

The dissertation is devoted to the improvement of the electromagnetic method for the evaluation of stresses and deformations in plastic-deformed zones of welded structures. Two cases were considered: residual welding strain and stress in the plastic zone of welded joints (plastic compression deformations and tensile stress) and plastic tensile deformations and tensile stress in other sections of welded structures.

The main park of technological equipment in Ukraine consists of welded constructions made of low-carbon and low-alloy steels. The issue of economic security in Ukraine depends on the continuation of the operation of existing equipment. The main factors of the efficiency of structures are the properties of the material, the presence of defects, stress and deformation. Knowledge about the stress-strain state of welded structures is an important factor in their successful exploitation. Work on the investigation of the tense state of welded structures has been under way for a long time, but the determination of stresses in the presence of plastic deformations is a little studied problem. Residual plastic deformations are known to cause residual welding stresses. Experimental methods for determining their values are very lacking, which greatly complicates the assessment of the technical condition of infrastructure objects.

Recently, there are many complex methods when simultaneously applying several electromagnetic methods of determination. This combination is quite successful, with the advantages of different methods offset their shortcomings.

On the basis of the analysis of the literature it is proposed to use two methods for solving the problems of work: the magnetoanisotropic method and method the coercive force. The latest method is proposed to be upgraded to work in variable fields, which will allow to scan welded structures. The research was carried out on samples with known plastic deformations and stresses.

Experimental investigations of the influence of plastic deformations and stresses of plane samples of steel 09Г2С with a thickness of 4 mm on the harmonic components of the signal of the magnetoanisotropic converter and the parameters of the loop of magnetic histometry are carried out.

Plastic deformations compression were created by heating a portion of a flat sample with a gas burner to a temperature of 650-750 °C with subsequent deformation. On a specially designed machine using a manual hydraulic jack, a plastic strain was created by stretching. Stretching tensions were driven by the help of a device for pure bending of flat samples.

On the basis of experimental studies, it has been proved that the stress-strain state of the plastic zone of welded joints and areas with plastic tensile deformations can be quantified by a harmonious analysis of the signal of a 4-pole magnetic anisotropic converter and parameters of the magnetic hysteresis loop.

It is advisable to use the parameters of a loop of magnetic hysteresis: half of the section along the induction axis (B) and the half-width (H_{max}) along the field axis to determine the degree of plastic deformation of the compression in the plastic zone of welded joints by the electromagnetic method. And to determine the stresses in the plastic zone of welded joints electromagnetic method, it is expedient to apply the parameters: amplitude of the first, third and sixth harmonics of the magnetic anisotropic converter.

It is offered to determine the degree of plastic tension in welded structures to use the parameter of the hemisphere along the induction axis (V_{max}) of the magnetic hysteresis loop of the converter of the parameters of reverse magnetization. And to determine the tensile stresses in these areas, it is expedient to use the phase of the first harmonic signal of the magneto anisotropic converter.

A new combined converter is proposed in two versions for the determination of the harmonic components of the magnetic anisotropic converter signal and the parameters of the magnetic hysteresis loop. In the first variant, the magnetizing electromagnet is supplemented with magnetization windings and measured by the method of the parameters of reverse magnetization.

In order to scan the design using the magneto anisotropic method, the direction 45° the relatively magnetizing electromagnet is used, and for scanning by the method of the parameters of reverse magnetization - in the direction of the magnetizing electromagnet. In the second variant, the magnetoanizotropic converter is supplemented by an independent core with a magnetization coil by the method of the parameters of reverse magnetization. Such a decision makes it possible to not change the direction of scanning of welded structures by the magneto anisotropic method and the method of parameters of reverse magnetization. In this case, the additional core increases the converter's measurement base. A patent for a utility model is obtained for the technical solution of such a combined converter.

The device MESTR-501 for the determination of the stress-strain state by the electromagnetic method on the natural welded structures has been developed. It consists of a combined converter, a module for measurement and signal processing, an industrial computer, an active monitor, and a battery pack. The device is lined up in a housing, which can take two positions: working and transporting. This solution allows you to move the device securely (the display is turned 180°). In the working position the device housing has the ability to be attached to the torso of the worker (operator) thanks to safety belts. This allows you to free operator hands for the ability to manipulate the converter and hold on

the elements of the design. The resulting data is processed on-site in an industrial computer, stored and displayed on the touch screen. The body of the device is made of carbon composite, which reduces the weight of the device and increases its resistance to impact on the elements of welded structures.

In practical testing of the device's performance during the implementation of the topic "Experimental study of the stresses in the welded sections of the railway and road bridge during mounting by bringing it through the Dnipro River", conducted studies of stresses and deformations in the vertical walls of the welded sections of the bridge. Determination of the stresses were carried out in places to the transfer device, on it and behind it. For this, the converter was supplemented with a special magnetic mount. Determination of the stresses in the weld sections of the run-flat construction allowed to carry out operative actions for leveling stresses in all walls and to successfully succession it from the stack on the support of 106 m).

Also, in the practical testing of the device's performance during the implementation of the topic "Assessment of the stressed state of the ship-reloader SP-7.3", conducted studies of stresses and deformations in the welded sections of the reloader. The ship-reloader was operated for 30 years under the conditions of the marine climate, which caused corrosion of the structural elements. The task was to investigate the stress-strain state and draw a conclusion on the possibility of further exploitation of the ship-reloader.

The results of work are also implemented in the educational process.

Key words: plastic deformations, stresses, residual welded deformations, residual welded stresses, welded structures, magnetic anisotropic transducer, magnetic hysteresis loop, harmonics, plastic zone of welded joints.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	18
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ	24
МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО	
СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ	
1.1 Особливості формування зони пластичних деформацій	24
під час зварювання зварних конструкцій	
1.2 Методи зменшення залишкових зварювальних напружень	28
1.3 Працездатність зварних конструкцій із залишковими	30
напруженнями	
1.4 Електромагнітні методи визначення напружено-	34
деформованого стану зварних конструкцій	
1.4.1 Магнітошумовий метод	34
1.4.2 Метод коерцитивної сили	36
1.4.3 Вимірювання втрат на перемагнічування	53
1.4.4 Електрорезистивний метод	55
1.4.5 Метод магнітної пам'яті металу	55
1.4.6 Комплексні електромагнітні методи	56
1.5 Магнітоанізотропний метод контролю механічних	59
напружень	
Висновки до розділу 1	66
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ	67
2.1 Вибір матеріалу для проведення досліджень	67
2.2 Методика досліджень сигналів методів МА та ПП на	68
плоских зразках	
2.3 Розробка експериментальної установки для визначення	70

	напружено-деформованого стану зварних конструкцій магнітоанізотропним методом	
2.3.1	Експериментальна установка	70
2.3.2	Перетворювач	71
2.3.3	Аналого-цифровий перетворювач	72
2.3.4	Програмне забезпечення	73
2.4	Розробка експериментальної установки для визначення напружено-деформованого стану зварних конструкцій методом параметрів перемагнічування	75
2.4.1	Експериментальна установка	75
2.4.2	Генератор сигналів	76
2.4.3	Підсилювач намагнічуючого сигналу	76
2.4.4	Перетворювач	77
2.4.5	Аналого-цифровий перетворювач	78
2.4.6	Програмне забезпечення методу ПП	79
2.4.7	Оптимізація поля намагнічування методу ПП	80
2.5	Наведення пластичних деформацій у плоских зразках	86
2.5.1	Методика та установка для наведення пластичних деформацій стиснення у плоских зразках	86
2.5.2	Методика та установка для наведення пластичних деформацій розтягу у плоских зразках	90
2.5.3	Зразки для наведення пластичних деформацій розтягу	94
2.6	Установка для наведення одновісних напружень у плоских зразках	100
2.7	Методика та засоби досліджень сигналів методів МА та ПП на моделі зварних з'єднань	103
	Висновки до розділу 2	110

РОЗДІЛ 3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ МЕТОДІВ ВІД ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ТА НАПРУЖЕНЬ	111
3.1	Експериментальні дослідження сигналів магнітоанізотропного перетворювача від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій стиснення	111
3.2	Експериментальні дослідження сигналів перетворювача параметрів перемагнічування від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій стиснення	119
3.3	Експериментальні дослідження сигналів магнітоанізотропного перетворювача від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій розтягу	124
3.4	Експериментальні дослідження сигналів перетворювача параметрів перемагнічування від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій розтягу	131
3.5	Експериментальні дослідження сигналів перетворювачів магнітоанізотропного та параметрів перемагнічування на моделі 33 –пластині із прорізами	136
3.6	Експериментальні дослідження сигналів магнітоанізотропного та параметрів перемагнічування перетворювачів від напружень та деформацій у зварному шві	141
	Висновки до розділу 3	150
РОЗДІЛ 4	РОЗРОБКА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ	151

РЕЗУЛЬТАТИВ РОБОТИ

4.1	Розробка комбінованого перетворювача	151
4.2	Розробка приладу для визначення напруженого стану зварних конструкцій магнітоанізотропним методом MESTER– 501	153
4.2.1	Склад приладу MESTER – 501	153
4.2.2	Робота приладу MESTER – 501	156
4.2.3	Компоновка приладу MESTER – 501	157
4.3	Впровадження результатів роботи	159
4.3.1	Впровадження при насуванні прогонової частини при будівництві залізнично-автомобільного мосту шляхом насування його через річку Дніпро	159
4.3.2	Впровадження в УДП «Укрхімтрансміак»	163
4.3.3	Впровадження в учбовий процес	173
	Висновки до розділу 4	174
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	175
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	176
	ДОДАТОК А	193
	ДОДАТОК Б	194
	ДОДАТОК В	195

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- А – амплітуда гармонічної залежності;
- А1 – перша гармоніка сигналу магнітоанізотропного перетворювача;
- А2 – друга гармоніка сигналу магнітоанізотропного перетворювача;
- А3 – третя гармоніка сигналу магнітоанізотропного перетворювача;
- А4 – четверта гармоніка сигналу магнітоанізотропного перетворювача;
- А5 – п'ята гармоніка сигналу магнітоанізотропного перетворювача;
- А6 – шоста гармоніка сигналу магнітоанізотропного перетворювача;
- А7 – сьома гармоніка сигналу магнітоанізотропного перетворювача;
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- ВВП – внутрішній валовий продукт;
- ЗЗ – зварне з'єднання;
- ЗЗН – залишкові зварювальні напруження;
- ЗК – зварні конструкції;
- ЗТВ – зона термічного впливу;
- КС – коерцитивна сила;
- МА – магнітоанізотропний метод;
- ПП – метод параметрів перемагнічування;
- В– половина перетину петлі гістерезису по осі індукції (вісь Y);
- Н– половина перетину петлі гістерезису по осі напруженості поля (вісь X);
- В_{тах}– половина максимальної висоти петлі магнітного гістерезису по осі індукції (вісь Y);
- Н_{тах}– половина максимальної ширини петлі гістерезису по осі напруженості магнітного поля (вісь X);
- S – площа петлі магнітного гістерезису;
- Φ – магнітний потік;
- E – модуль пружності;
- σ – напруження.

ВСТУП

Актуальність теми. В Україні працює 55 тис. промислових підприємств, де створюється 26% ВВП країни. Частка експорту промислової продукції у валовому внутрішньому продукті становить близько 40 % [1]. Основний парк технологічного обладнання складають зварні конструкції (далі - ЗК) із низьковуглецевих та низьколегованих сталей. Розрахунковий термін експлуатації технологічного обладнання, в основному, вичерпано. Питання економічної безпеки України залежить від продовження експлуатації існуючого обладнання. Основними факторами працездатності конструкцій є властивості матеріалу, наявність дефектів, напруження та деформації. Знання про напружено-деформований стан зварних конструкцій є одним із важливих чинників їх успішної експлуатації. Роботи про дослідженню напруженого стану ЗК ведуться давно, однак визначення напружень в умовах наявності пластичних деформацій є недостатньо дослідженою ділянкою. Відомо, що причиною залишкових зварювальних напружень є залишкові пластичні деформації. Експериментальних методів визначення залишкових пластичних деформацій та напружень дуже бракує, що значно ускладнює оцінку технічного стану інфраструктурних об'єктів. Тому дослідження напруженого стану ЗК в умовах пластичного деформування є актуальною задачею для промисловості України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-дослідницька робота за темою дисертації проводилась на кафедрі електрозварювальних установок Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за темами: «Експериментальне дослідження напружень в зварних секціях залізнично-автомобільного мосту під час монтажу шляхом насунання його через р. Дніпро», державний реєстраційний 0109U002857 «Система моніторингу напруженого стану магістральних трубопроводів магнітоанізотропним методом», «Діагностика,

технічне обслуговування і коригування потоку інформаційних даних вузла моніторингу механічних напружень аміакопроводу «Тольятті-Одеса» на ділянці переходу через р. Дніпро», «Метрологічне обслуговування і атестація приладу типу «MESTR-411» для вимірювання механічних напружень у газопроводах», «Оцінка напруженого стану судноавантажувача 7.3», «Впровадження приладів неруйнівного контролю напруженого стану магістрального аміакопроводу». Дисертантом проведено планування і виконання досліджень, а саме: вимірювання гармонічних складових, побудова та порівняння залежностей, розроблено апаратні рішення для реалізації вдосконаленого електромагнітного методу.

Мета і завдання дослідження - удосконалення електромагнітного методу неруйнівного контролю для оцінювання напружень та деформацій у пластично-деформованих зонах ЗК.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі задачі:

1. Провести аналіз вимірювальних параметрів електромагнітних методів контролю і на цій основі вибрати найбільш оптимальні.
2. Дослідити вплив пластичної деформації та напружень на гармонічні складові сигналу магнітоанізотропного перетворювача.
3. Дослідити вплив пластичної деформації та напружень на параметри петлі магнітного гістерезису та провести вибір найбільш інформативних.
4. Розробити методичні засади для оцінювання напружень та пластичних деформацій у пластичній зоні зварних з'єднань і ділянках із пластичними деформаціями розтягу.
5. Перевірити на моделі зварних з'єднань методичних засад для оцінювання напружень та пластичних деформацій у пластичній зоні зварних з'єднань.
6. Розробити апаратні рішення для реалізації багатопараметрового електромагнітного методу для моніторингу напружено-деформованого стану ЗК.

Об'єкт досліджень – зварні листові конструкції.

Предмет дослідження – одновісні напруження та деформації у пластичній зоні зварних з'єднань і у ділянках із пластичними деформаціями розтягу.

Методи дослідження ґрунтуються на створенні в плоских зразках пластичних деформацій стиснення та розтягу із подальшим наведенням в зразках напружень розтягу, експериментальних дослідженнях залежності параметрів електромагнітних методів від деформацій та напружень, перевірці отриманих залежностей на натурних та модельних експериментах. Розроблено прикладну програму для реалізації алгоритмів розрахунків параметрів перемагнічування за величиною вихідного сигналу перетворювача.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше отримано параметри електромагнітного методу, за якими можливо оцінювати деформації в зоні пластичних деформацій зварних конструкцій. Такими параметрами петлі магнітного гістерезису є B (половина перетину петлі гістерезису по осі індукції) та H_{max} (половина максимальної ширини петлі гістерезису по осі напруженості магнітного поля).

2. Вперше показано, що амплітуди першої, третьої та шостої гармонік сигналу магнітоанізотропного перетворювача при дії напружень в умовах пластичних деформацій стиснення при відомих пластичних деформаціях дає можливість визначати напруження.

3. Вперше показано, що фаза першої гармоніки сигналу магнітоанізотропного перетворювача при дії напружень в умовах пластичних деформацій розтягу змінюється в обмежених діапазонах (на відміну від тільки напруженого стану). Величини самих діапазонів зміни фази залежать від значення пластичних деформацій. Це дає можливість визначати пластично-деформовані ділянки конструкції та величину пластичної деформації.

4. Вперше визначено параметр електромагнітного методу контролю, за яким можливо оцінювати напруження в зоні пластичних деформації розтягу ЗК. Таким

параметром петлі магнітного гістерезису, за умови відомих пластичних деформацій, $\epsilon_{B_{max}}$ – половина максимальної висоти петлі магнітного гістерезису по осі індукції.

Практичне значення одержаних результатів. Можливість визначення зон пластичних деформацій дозволяє в стислі строки приймати рішення щодо подовження термінів експлуатації ЗК або їх ремонту, що має істотне практичне значення. Розроблено апаратні рішення для реалізації багатопараметрового електромагнітного методу, які передбачають наявність чотирьох-полюсного магнітоанізотропного перетворювача, перетворювача параметрів перемагнічування, модуля вимірювання та обробки сигналів, засобів комп'ютерної техніки та акумуляторного блока живлення. Дані апаратні рішення мають широку можливість впровадження на підприємствах України.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях «Досконалість зварювання – комплексний підхід» (Київ, НТУУ «КПІ», 2012, 2014, 2016рр.); «Зварювання та споріднені процеси і технології» (Київ, НТУУ «КПІ», 2009, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015 рр.); «Зварювання та суміжні технології» (Київ ІЕЗ ім. Є.О. Патона, НАНУ 2009р.); IX міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина», (Київ 2016 р.); наукових семінарах кафедри електрозварювальних установок НТУУ «КПІ» 2004-2010 рр., „XXI Seminarum “Nieniszczace badania materialow”, Zakopane, 18-20 marca, 2015, Anais do POSMEC 2016 Simposio do Programa de Pos - Graduacao em Engenharia Mecanica, 2016.

Особистий внесок здобувача. Автором проведено науково-дослідну роботу, спрямовану на вдосконалення електромагнітного методу оцінювання напружень та пластичних деформацій. Самостійно поставлені задачі та намічені шляхи їх вирішення, проведені експериментальні дослідження, узагальнені результати та зроблені висновки. Порівняно залежності гармонічних складових сигналу магнітоанізотропного перетворювача та перетворювача параметрів перемагнічування від напружень і пластичних деформацій. Запропоновано

методичні засади використання отриманих залежностей для визначення пластичних деформацій стиснення і розтягу та наявних при цьому напружень розтягу. Розроблено апаратні рішення приладу.

При проведенні досліджень, результати яких викладені у співавторстві, автору належить: в роботі [2] – розробка апаратних рішень; [3] – розроблено алгоритм визначення напружень вигину, проведено випробування на натурних об'єктах; [4, 5, 6] – розроблено алгоритм розрахунку поздовжніх напружень, проведено випробування на натурних об'єктах; [7] – розроблено принципи передачі та обробки даних моніторингу; [8] – запропоновано використання параметрів петлі магнітного гістерезису для визначення напружень, а саме: нормування напівперерізу петлі по осі поля шляхом розділення на величину найбільшого поля; [9] – запропоновано визначати структурну складову методом коерцитивної сили, а складову напружень - магнітоанізотропним методом; [10] – запропоновано додатково у перетворювач переманічування ввести магнітоанізотропний перетворювач; [11] - запропоновано проводити вимірювання магнітної анізотропії до, на і після проходу прогонової споруди через перекаточний пристрій.

Публікації. За результатами проведених досліджень опубліковано 25 наукових праць, в тому числі: 5 статей у провідних наукових фахових виданнях України та 2 - у закордонних виданнях; отримано 3 патенти України на корисну модель; опубліковано 15 тез доповідей в збірниках науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань, додатків. Загальний обсяг роботи – 195 сторінок. Дисертація містить 140 рисунків, 12 таблиць, перелік посилань з 131 найменуваннями, 3 додатки на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

1.1 Особливості формування зони пластичних деформацій під час зварювання зварних конструкцій

У зварному з'єднанні має місце активна зона (зона пластичних деформацій) - $2b_{\text{п}}$. Розміри цієї зони встановлюються по-різному: у залежності від прийнятих гіпотез при розрахунках. Як штучний прийом, використовують заміну дії залишкових зварювальних напружень дією фіктивної усадковою силою.

У загальному випадку фіктивна усадкова сила визначається

$$P_{\text{yc}} = \int_{-bn}^{+bn} \varepsilon_{\text{x пл.зал.}} \cdot E d_l \quad (1)$$

або $P_{\text{yc}} = 2b_{\text{п}} \delta \sigma_{\text{T}}$

де P_{yc} - фіктивна усадкова сила,

E - модуль пружності,

σ_{T} – межа текучості сталі,

bn – напівширина зони пластичних деформацій,

$\varepsilon_{\text{x пл.зал.}}$ – залишкова поздовжня пластична деформація.

Найбільш обґрунтованою умовою переходу напруженого тіла від пружного стану до пластичного є умова Губера-Мізеса: кожна елементарна частинка металічного матеріалу тіла переходить із пружного стану у пластичне коли інтенсивність напружень досягає величини, рівної напруженню текучості. Тобто [12]

$$\sigma_i = \sigma_{\text{T}} \quad (2)$$

Умову (2) можливо виразити через головні напруження [13]

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_{\text{T}} \quad (3)$$

Для двовісного стану

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = \sigma_T^2 \quad (4)$$

Або

$$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = \sigma_T \quad (5)$$

Зміцнення металу у процесі пластичної деформації (нагартування) пояснюється збільшенням числа дефектів кристалічної будови (дислокації, вакансії, міжвузлові атоми). Збільшення густини дефектів кристалічної будови утруднює переміщення нових дислокацій, відповідно зменшує пластичність [13].

Залежність межі текучості від розміру зерна є найважливішою в теорії межі текучості полікристалу. Границі зерен є ефективними бар'єрами для руху дислокацій. Чим менше зерно, тим частіше зустрічаються ці бар'єри на шляху дислокацій ковзання, та більше напруження повинні бути для продовження пластичної деформації [14].

Пружні напруження розтягу призводять до повільного підйому опору деформуванню аж до межі текучості. Потім відбувається відносно різкий спад напружень та наступна деформація (за звичай на 0,1-1%) йде при незмінному зовнішньому навантаженні – утворюється площадка текучості із попереднім зубом [14]. Із підвищенням температури випробувань висота зуба та довжина площадки текучості за звичай збільшується.

Площадка текучості закінчується на 2-2,5% деформації.

Верхня межа текучості (поява зуба на діаграмі розтягування) відповідає пластичній деформації $\varepsilon=0,02-0,5\%$.

Автор [14] отримав експериментальні дані, що максимальна температура основного металу у місці закінчення полос текучості (пластичного деформування) не перевищує 200 °С. Полоси текучості розвиваються попереду ізотерми 200 °С.

Відповідно до [14, 15] у полосі текучості розвиваються процеси, що подібні протіканню процесів на площадці текучості при одновісному розтягуванні. Тобто

після вичерпання запасу пластичності на площадці текучості настає етап зміцнення та з'являється нова полоса текучості на сусідній ділянці. Тому зона пластичних деформацій являє собою метал, що має пружні та пластично-деформовані ділянки.

Аналіз температурних умов при появі різних систем полос текучості показує, що мікроскопічна пластична деформація при наплавці по центру протікає при температурах нижче 200 °С для низьковуглецевих сталей [14].

Аналіз полос текучості при нагріванні та охолодженні металу під час зварювання показує як розвиваються різні системи полос текучості. Радіальні полоси характеризують зону пластичних деформацій при нагріві, а поперечні – при охолодженні. Таким чином, при зварювання з наступним охолодженням формуються дві зони пластичних деформацій [14]. Ширина зони пластичних деформацій при охолодженні складає 0,7-0,8 від ширини зони пластичних деформацій при нагріві (теоретичні розрахунки дали 0,5) [14]. Посилаючись на вимірювання приладом ИОН-4, автор приходить до висновку, що шириною зони пластичних деформацій є саме зона пластичних деформацій при охолодженні. Цим він пояснює розбіжності між теоретичними та експериментальними даними ширини зони пластичних деформацій та пропонує при розрахунках усадкового зусилля брати ширину зони пластичного деформування при охолодженні на відміну від Трочуна І.П., Окерблома Н.О., Ніколаєва Г.А. та інших, що беруть ширину зони пластичного деформування при нагріві [14].

В цілому при визначенні усадкового зусилля P_{yc} є методичні труднощі у встановленні розміру площі пластично-деформованого металу при охолодженні. Площа пластичних деформацій залежить від типу з'єднання, товщини, підготовки крайок, характеру тепло вкладення. Таким чином, зона пластичних деформацій та усадкове зусилля P_{yc} повинні визначатись у кожному конкретному випадку [14].

При наплавці на крайку

$$P_{yc} = (F_{\text{пд}} + F_{\text{ш}}) \cdot \sigma_T, \quad (6)$$

де $F_{пл}$ – площа пластичного деформування в межах листів основного металу,
 $F_{ш}$ – площа шва за межами листів основного металу.

В наслідок нерівномірності введення тепла по товщині металу при зварювання площа зони пластичного деформування і поперечному перерізі значно відрізняється від прямокутника (рис. 1.1). Приймаючи до уваги можливі збурення при зварюванні, корисно застосовувати фізичні методи визначення зони пластичного деформування у кожному конкретному зварному шві.

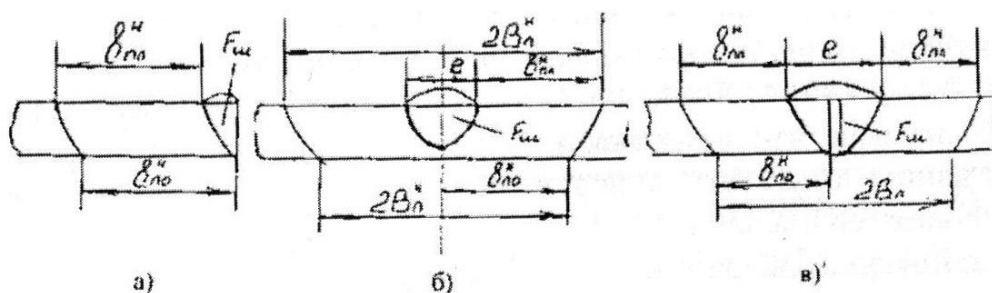


Рис.1.1 – Формування активної зони у різних типів зварних з'єднань: а – наплавка на крайку; б – наплавка на лист; в – зварювання в стик.

В наслідок складності явищ не має єдиного методу визначення зварювальних напружень та деформацій. Більшість дослідників визначає пластичну деформацію при зварюванні в межах від 1 до 5%. У середньому всі сходяться, що на лінії сплавлення розмір пластичної деформації складає 2% [14].

Експериментальне визначення зони пластичних деформацій $2b_{пл}$ дозволяє розрахувати усадкове зусилля (вважаючи, що для листових конструкцій напруження постійні у перерізі). Це у свою чергу дозволяє змодельовати всі залишкові напруження, що є актуальним завданням. Визначення напружень у пластичній зоні дозволяє із більшою точністю визначити усадкове зусилля.

При експлуатації ЗК залишкові напруження у загальному випадку складаються з робочими і впливають на працездатність ЗК. Тому експериментальне визначення дійсних напружень має велике значення для оцінки надійності ЗК.

1.2 Методи зменшення залишкових зварювальних напружень

Предметом досліджень у роботі є залишкові, робочі напруження та пластичні деформації, тому потрібно мати зразки для досліджень із різними напруженнями та деформаціями. Приймаючи до уваги, що зварювання це є спеціальний процес [16] і вкрай важко забезпечити однакові залишкові зварювальні напруження (далі – ЗЗН) та деформації при варіюванні параметрами зварювання, природно розглянути інші відомі методи впливу на ЗЗН та деформації.

Усі після зварювальні методи полягають у зменшенні залишкових пластичних деформацій вкорочення. Це може бути: проковування, прокатка, прикладання зусиль розтягу, термомеханічна обробка.

Проковування та прокатка змінюють структуру поверхневого шару металу завдяки нагартуванню і тому не можуть бути застосовані. Прикладання зусиль розтягу та термомеханічна обробка можуть застосовуватись для вирішення поставленої задачі.

У роботі [17] запропоновано для зменшення ЗЗН накладати напруження розтягу σ_p при зварюванні. Це сприяє пластичному деформуванню розтягу, що є протилежним до пластичних деформацій при зварюванні.

При зварюванні напруження σ'_p збільшуються у реактивній зоні завдяки пластичному стану у зоні $2b_n$ та складуть

$$\sigma'_p = \sigma_p \frac{b}{b - 2b_n}, \quad (7)$$

де b – ширина пластини

Напруження у активній зоні будуть

$$\sigma' = \sigma_T - \sigma'_p \quad (8)$$

Після зварювання та зняття навантаження отримаємо напруження в активній зоні [18]

$$\sigma_{\text{акт}} = \frac{\sigma'_2 S_2}{S_1 + S_2} = \frac{(\sigma_T - \sigma'_p) S_2}{S}, \quad (9)$$

де S, S_1, S_2 - площі відповідно поперечного перерізу пластини, активної зони, реактивної зони;

Відповідно у реактивній зоні

$$\sigma_{\text{рект}} = \frac{\sigma_{\text{акт}} S_1}{S_1 + S_2} = \frac{(\sigma_T - \sigma'_p) S_1}{S}, \quad (10)$$

Відповідно зниження ЗЗН у активній зоні при $\sigma_p = \sigma_T$ повинні дорівнювати нулю. Однак автор [18] вказує, що повного зниження напружень експериментально не було досягнуто (рис. 1.2)

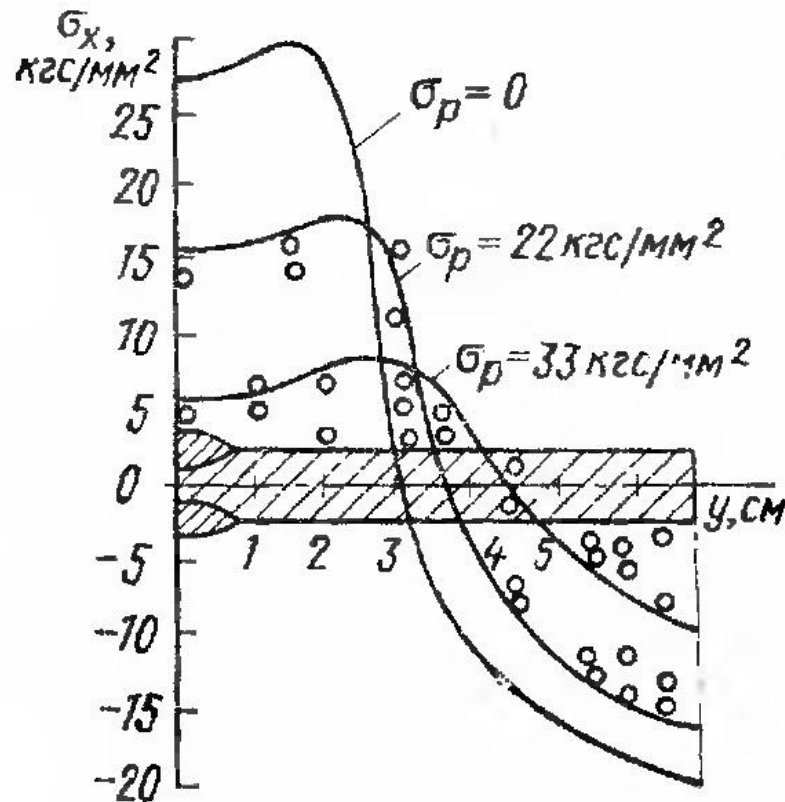


Рис. 1.2 Розподіл ЗЗН в зварному з'єднанні низьковуглецевої сталі [18]

Одночасно із зниженням ЗЗН відбувається зменшення ширини активної зони. Це пов'язують з тим, що з віддаленням від шва напруження розтягу переходять у стиснення не стрибком, а поступово на деякій ділянці.

1.3 Працездатність зварних конструкцій із залишковими напруженнями

Вплив ЗЗН проявляється у підвищенні корозійних процесів, а також у сприянні статичному та динамічному руйнуванню. Корозійне руйнування – традиційне через втрату металу конструкції, що посилюється дією напружень. Другим шляхом є насичення іонами водню внаслідок катодного захисту [18]. Цей процес відбувається повільно (десятки років) особливо в місцях пошкодження ізоляції. При цьому відбувається зменшення ударної в'язкості металу конструкції (деградація властивостей). Наявність дефектів та незначних напружень в такому випадку може привести до руйнування. Третім механізмом є стрес-корозія. Процес стрес-корозії є недостатньо вивченою цариною, однак всі дослідники сходяться, що ЗЗН в купі із робочими сприяють стрес-корозії [19].

Працездатність ЗК залежить від наступних чинників: властивостей металу, наявності дефектів, напруженнями і деформаціями. Традиційно проводились перевірки на наявність дефектів, однак поява деградації властивостей металу конструкції вимагає більш ретельного визначення діючих напружень та деформацій [20]. По статистичним даним деградація властивостей металу призводить до половини аварійних ситуацій. Циклічний характер робіт ЗК проявляється у більше ніж 10^5 циклів навантаження – розвантаження і можуть руйнуватись від явищ втоми [21].

У роботі [22] зазначено, що в процесі тривалої експлуатації сталей показники міцності (твердість, межа текучості, межа міцності) зростають на 10...15%, в'язко-пластичні показники (відносне подовження, відносне звуження) зменшуються на 5...7%, показники опору крихкому руйнуванню (ударна в'язкість, тріщиностійкість) зменшуються на 15...20%.

Отже вимірювання діючих напружень та деформацій на натурних ЗК є необхідним для моніторингу їх технічного стану з метою прийняття виважених

технологічних рішень. Тенденції розвитку напружень та деформацій можна використовувати для прогнозування залишкового ресурсу [23, 24].

Просади ґрунту несучих інфраструктурних ЗК призводять до додаткових навантажень на ЗК. При проведенні ремонтних робіт з метою усунення дії цих факторів необхідно вимірювати напруження та деформації цих ділянок ЗК для ефективного їх ремонту. Ремонтне зварювання створює нові залишкові напруження, що разом із робочими можуть досягати значних величин. У роботі [25] зазначається недопустимість зміни напружень після ремонту ЗК. Запобігти просадкам ґрунту дуже важко, а часто і неможливо. Однак періодичне визначення діючих напружень та деформацій є вкрай важливими чинниками для успішної експлуатації ЗК.

На теперішній час є багато методів зменшення впливу ЗЗН на працездатність ЗК, а саме: стійкість проти корозійного розтріскування, опірність ЗЗ крихким руйнуванням (особливо при низьких температурах), міцність при статичних і перемінних навантаженнях.

У роботі [26] запропоновано при статичних навантаженнях додавати не напруження, а деформації. Так при невеликих (порівняно із пластичністю металу) деформаціях ними пропонується нехтувати. Якщо залишкові зварювальні деформації сягають значної величини (або при низькій пластичності металу), то це може значно вплинути на працездатність ЗК.

Розрізняють наступні чинники, що сприяють крихкому руйнуванню: об'ємний напружений стан, велика швидкість деформації, концентратори напружень, наявність напружень розтягу, масштабний фактор, від'ємні температури, дефекти типу тріщин, деформаційне старіння, тощо [27, 28, 29].

В роботі [29] проведено дослідження дії ЗЗН та деформаційного старіння на крихкість руйнування ЗЗ із маловуглецевої сталі. В області в'язких руйнувань самі ЗЗН не впливають на міцність при високих температурах. При зниженні температури до квазіхрупкого руйнування і нижче знижується опірність сталі виникненню

крихких тріщин. Деформаційне старіння, що проявляється у зменшенні ударної в'язкості підвищує температури квазіхрупкого руйнування.

У роботі [30] зазначено, що зварювальні процеси створюють значний вплив на механічні властивості металу. Відносне подовження зразків після зварювання знизилося в середньому на 32%. Межа плинності підвищилась в середньому на 12%. Межа міцності підвищилась в середньому на 4%.

У роботі [31] зазначається, що ЗЗН розтягу при циклічних навантаженнях впливають як концентратор напружень. Навіть при малих значеннях робочих напружень ЗЗН розтягу мають негативний вплив. У роботах [32, 33, 34, 32] зазначається, що ЗЗН більше впливають на працездатність ЗК при наявності концентраторів (конструктивних або технологічних). Так ЗЗН стиснення збільшують межу витривалості від втоми в кілька разів, а ЗЗН розтягу – знижують.

Із підвищенням межі текучості матеріалу зростають і ЗЗН [42]. При циклічному навантаженні ЗЗН дуже впливають (до 90% довговічності) на стадію розвитку тріщини [35]. Зазначається, що концентратори напружень та високі ЗЗН розтягу знаходяться у зоні термічного впливу. Термічний цикл зварювання та залишкові пластичні деформації можуть підвищувати межу текучості межу витривалості металу, що може негативно впливати довговічність.

Проведення експериментальних досліджень [36, 37, 38] показало, що явища втоми прискорюються при наявності концентратора при ЗЗН розтягу. Напротивагу цьому, ЗЗН стиснення призводять до зменшення швидкості росту тріщини. В роботі [39] показано, корозійні руйнування (тріщини) викликані напруженнями розтягу. Із збільшенням напружень розтягу швидкість росту тріщин втоми зростає. ЗЗН в купі із робочими напруженнями підвищують концентрації пружно-пластичних деформацій у мікротріщинах та у вершині тріщини. Робиться висновок, що підвищення напружень призводить до прискорення корозійного руйнування. Зазначається, що додавання робочих напружень до ЗЗН призводить до прискорення крихкого руйнування навіть при малих робочих напруженнях [40]. У разі коли розтягуючи

ЗЗН розташовані перпендикулярно до робочих напружень розтягу - крихке руйнування може наступати при додатних температурах [41].

Стрес-корозія ЗК таких як магістральні трубопроводи є причиною половини їх руйнувань [41]. Наводять два чинники для настання стрес-корозії: тривалий час катодного захисту трубопроводу (особливо при наявності відшарувань ізоляції) та наявність високих напружень розтягу (ЗЗН та робочі). Із часом метал трубопроводу насичується атомарним воднем, що призводить до зменшення ударної в'язкості металу (деградації) [19]. Наприклад, ВНИИСТ для запобігання розвитку стрес-корозії вимагає обмежити напруження 65% від межі текучості та не розташовувати зону із ЗЗН у верхній частині трубопроводу, що в умовах просадки ґрунту може привести до складання робочих напружень розтягу із ЗЗН. Із цієї причини ВНИИСТ не рекомендує використання труб із двома поздовжніми швами (Храцизький трубний завод) [42].

Матеріали ЗК (мало вуглецеві та низьколеговані сталі) відносять до таких, що є релаксаційностабільними. Експериментальне підтвердження цього є виявлення високих ЗЗН до 450 МПа на кільцевому шві трубопроводу «Берге - Якутськ» (діаметр трубопроводу 530 мм, товщина стінки 8 мм, сталі 10Г2ФБЮ) після 40 років експлуатації [43]. Цей факт підтверджує думку релаксаційної стабільності матеріалів.

Пластична деформація величиною до 2% призводить до зміни механічних властивостей зони термічного впливу, впливає негативно на корозійну міцність, холодноламкість, змінює температури початку та кінця перетворень тощо [44, 45, 46, 47, 48].

Визначення напружень і пластичних деформацій в пластичній зоні ЗК набуває актуального значення зважаючи на вичерпання розрахункового терміну експлуатації ЗК та явища деградації властивостей металу в умовах сумісної дії напружень від робочих навантажень і ЗЗН.

1.4 Електромагнітні методи визначення напружено-деформованого стану зварних конструкцій

Приймаючи до уваги, що основна маса ЗК виготовлені із феромагнітних матеріалів, логічно буде застосування електромагнітних методів для вирішення задач роботи. Головною перевагою електромагнітних методів є те, що вони неруйнівні. Електромагнітні методи широко використовуються в промисловості, але для завдань визначення напружень в умовах пластичного деформування почали застосовуватись не так давно (близько 10 років).

1.4.1 Магнітошумовий метод

Магнітошумовий метод (скачків Баркгаузена) відкритий ще у 1919 році. При перемагнічуванні феромагнітних матеріалів відбувається рух доменів. Однак дефекти кристалічної структури, границі зерен є перешкодою для руху доменів. Границя домена зупиняється перед дефектом на деякий час, за який поле збільшується на величину, що дозволяє проскочити цей дефект. Відбувається стрибкоподібна зміна намагніченості матеріалу. Такі процеси відбуваються безперервно і можна спостерігати велику кількість стрибків Баркгаузена [49, 50].

Відповідно напруження 3-го, 2-го та 1-го роду впливають на переміщення доменних границь. Ще більше впливає пластична деформація, яка проявляється через рух та появу нових дислокацій. Зміна структури металу також є чутливим фактором для шумів Баркгаузена. Однак стискаючі напруження досить слабо впливають на шуми Баркгаузена. Крім того, для шумів Баркгаузена властивий ефект, що проявляється при зменшенні напружень, котрий полягає в зменшенні скачків поки напруження знову не перевищать раніше отриманий рівень. Немає чітких залежностей шумів Баркгаузена від напружень та пластичних деформацій. Пропонується в кожному окремому випадку проводити своє градування.

Рекомендується застосовувати методи розпізнавання образів для визначення двовісного напруженого стану [51].

У роботі [52] одержана залежність параметра шумів Баркгаузена від напружень розтягування і стиснення для зварних зразків зі сталі API SL X70 . При цьому вимірювання проводилися далеко від зварного шва, де метал не піддавався нагріву (основний метал - Base Metal), і в зоні термічного впливу, де внаслідок нагрівання при зварюванні відбулися структурні зміни (Heat affected zone - HAZ).

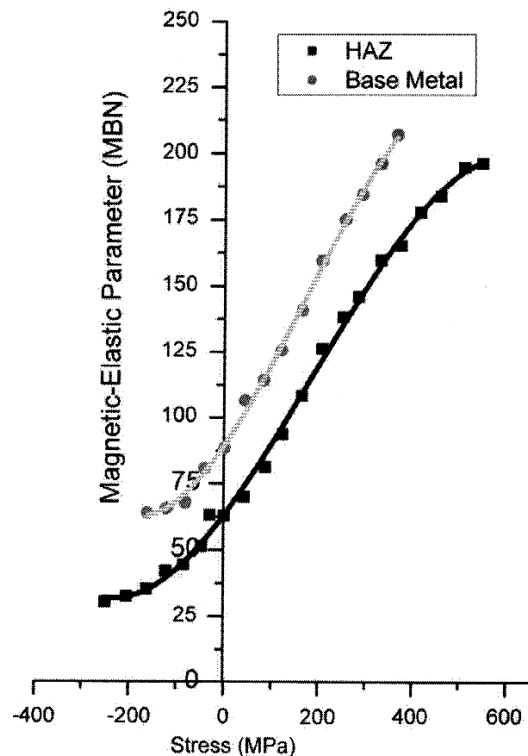


Рис. 1.3. Залежність параметрів шумів Баркгаузена від напружень для основного металу (●) та зони термічного впливу (■) зварних швів [53].

Автори отримали хорошу чутливість параметрів шумів Баркгаузена до змін напруженого стану. Але, так само як для методу коерцитивної сили, існує велика чутливість до структури матеріалу. У даному прикладі зміни структури пов'язані з нагріванням в зоні зварного з'єднання. Автори використовували тільки один зразок та усереднювали покази на всю зону термічного впливу, що не є коректним. Отримані залежності (рис.1.3) використовувалися авторами роботи [53] для

калібрування при вимірах в різних зонах зварного шва. Попри все, автори отримали класичний вид залежності поздовжніх ЗЗН.

Метод шумів Баркгаузена добре працює в умовах заводських лабораторій в першу чергу для контролю якості поверхні при шліфуванні. Однак застосування на натурних ЗК поки ще не знайшов.

1.4.2 Метод коерцитивної сили

Метод коерцитивної сили (далі - КС) давно використовується для контролю структури металу, а саме: загартування, нагартування, зміцнення поверхні та контролю магнітних матеріалів [53, 54, 55, 56, 57]. Протягом останніх 10-15 років метод пропонують застосовувати для вимірювання напружень та пластичних деформацій. У роботі [58] метод КС визнається ефективним для оцінки експлуатаційних змін в металі у процесі деградації по типу втоми (тобто сукупності зміни властивостей металу від напружень, температури, тиску, корозії, впливу агресивних середовищ, радіаційного випромінення). КС при цьому збільшується на 300...400% для феромагнітних конструктивних марок сталей широкого застосування, коли метал в режимі малоциклової втоми та статичного-квазістатичного навантаження накопичує незворотні мікропошкодження, починаючи від початкового стану до передруйнівного.

Зміна КС при одноосьовому навантаженні досліджена у роботі [59]. Так при пружному розтягуванні вздовж напружень КС трохи зменшується, а потім починає зростати (рис.1.4). При вимірюванні поперек КС постійно зростає. Запропоновано визначати різницю КС (поперек та вздовж) як відносну анізотропію. З цим погоджуються й інші дослідники [60].

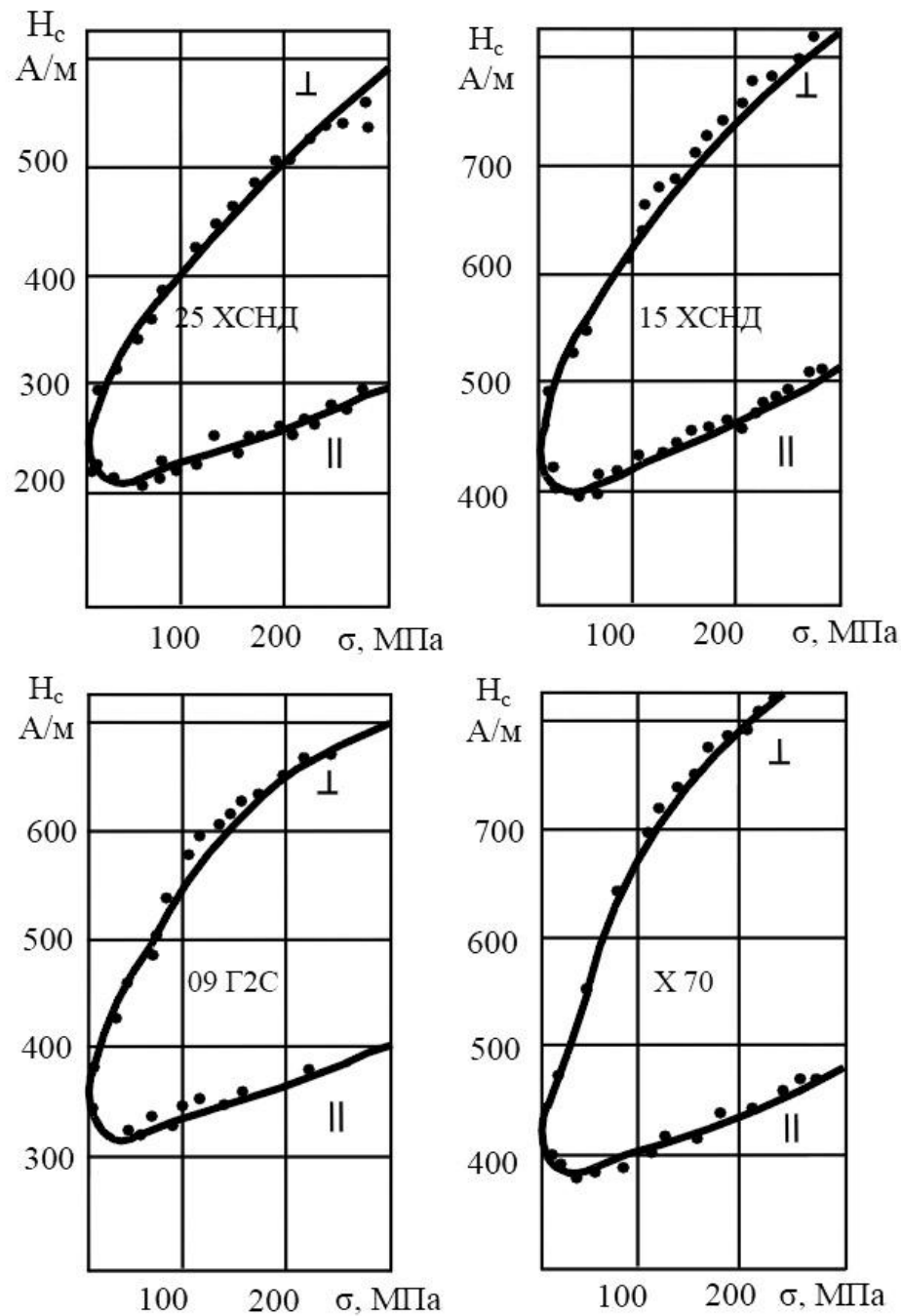


Рис. 1.4 Розрахункові та експериментальні залежності коерцитивної сили H_c від напружень. II – поздовжня КС, \perp - поперечна КС [60]

Графіки залежностей абсолютної анізотропії КС $\Delta H_c = H_{c\perp} - H_{cII}$ від розтягу розходяться та відрізняються в області навантажень більше 100 МПа (рис. 1.5) [60].

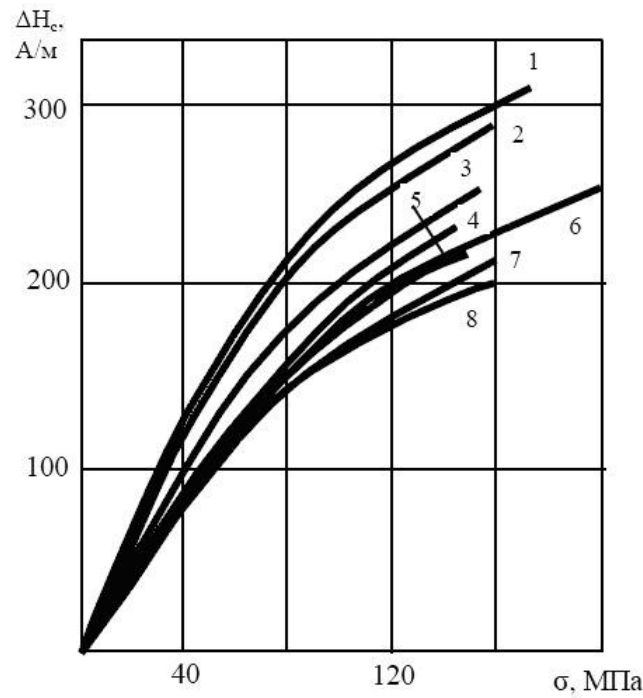


Рис. 1.5 Залежність абсолютної анізотропії КС $\Delta H_c = H_c^\perp - H_c^\parallel$

від величини напружень розтягу для сталей: 1- X70; 2- 15XCHD; 3,4,5 – 09Г2С; 6- 17ГС; 7- 25XCHD; 8 – Сталь 3 [60].

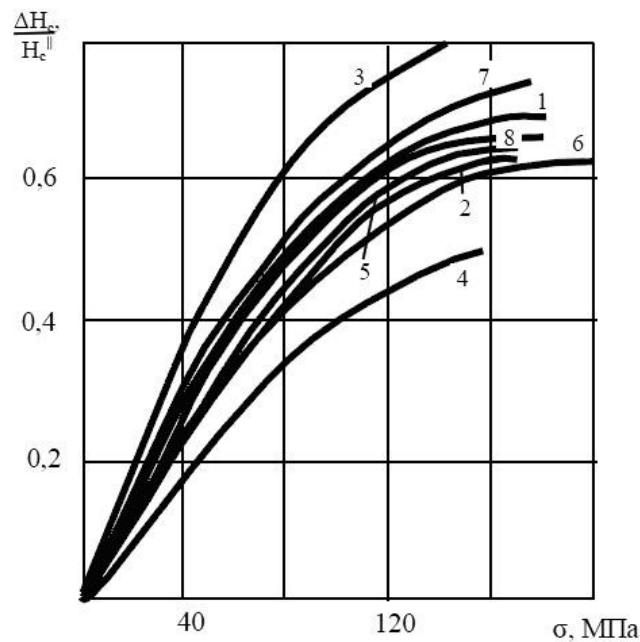


Рис. 1.6 Залежність відносної анізотропії КС $\Delta H_c / H_c^\parallel$ від величини напружень розтягу для сталей: 1- X70; 2- 15XCHD; 3,4,5 – 09Г2С; 6- 17ГС; 7- 25XCHD; 8 – Сталь 3 [60].

У роботі [61] зазначено, що вздовж напружень розтягу КС зростає повільніше ніж при стисненні. Є багато досліджень КС від напружень для різних ступенів термообробки. Для цього у роботі [62] досліджувалась сталь X70 при двовісному розтягуванні після відпалу та в стані поставки. Отримані характеристики КС значно відрізняються, що підтверджує значну чутливість КС до зміни структури, яка є більшою ніж від напружень. Дослідження на розтяг-стиснення та розтяг-розтяг показали, що коли невідома схема напружень, то не можна і визначити напруження [63, 64]. Для низьковуглецевих сталей зроблено висновок про неможливість визначення методом КС напружень більших за половину межі текучості [65, 66].

Багато дослідників признають залежність КС від наявних дислокацій та відповідно від напружень навколо них (3-го та 2-го роду) та напружень 1-го роду [67].

При розтягування КС змінюється слабо і неоднозначно: спочатку із ростом напружень від нуля вона слабо зменшується та досягає мінімуму в області, де напруження порівняні із середньою величиною внутрішніх напружень 1-го роду; далі КС має незначне зростання.

При розвантаженні густина дислокацій не може помітно змінитися, в результаті чого КС є сумою трьох складових: її початкового значення, порівняно незначного приросту за рахунок збільшення густини дислокацій та різкого збільшення при розвантаженні, що пов'язано із залишковими напруженнями стиснення.

В більшості робіт не вказано у якому стані (навантаження- розвантаження) вимірювалась КС. Зазначено, що КС в принципі не може бути однозначно пов'язана із діючими раніше напруженнями, так із залишковими напруженнями у стані розвантаження [71].

При пластичній деформації більше 2,5% залишкові напруження досягають своєї межі. При цьому повільний ріст КС у навантаженому і розвантаженому станах зумовлений тільки збільшенням густини дислокацій.

Зняття пластичних розтягуючих напружень призводить до різкого (у рази) збільшення КС, що зумовлено залишковими напруженнями стиснення.

Накладення та зняття напружень розтягу призводить до зникнення початкової системи залишкових напружень 1-го роду і формуванню залишкових напружень, що відповідають характеру навантаження та геометричним параметрам зразка [71].

Зняття стискаючого пластичного навантаження призводить до зворотнього порівняно з розтягом результату: до різкого зменшення КС порівняно із навантаженим станом внаслідок виникнення залишкових пружних напружень розтягу [71].

На початкових етапах пластичного деформування (до 6%) значно збільшується щільність дислокацій та відповідно напружень навколо них, що призводить до зростання КС. Цей ефект запропоновано використовувати для контролю явищ втоми [68, 69, 70, 71].

Ті ж автори проводили дослідження зразків на одноосьове розтягування для сталей Ст3, Сталі 20, 09Г2С. Навантаження відбувалось ступінчато із повним розвантаженням та без такого. На кожному ступені проводили визначення КС у навантаженому та розвантаженому станах (рис. 1.7)

Були проведені дослідження [72] на малоциклову втому плоских зразків на одноосьове розтягування та отримали графіки (рис.1.8) прогнозування залишкового ресурсу металоконструкцій. Амплітуду і частоту навантаження змінювали так, щоб забезпечити режими навантаження від "легкого" до "вельми важкого" по класифікації ISO 4301 (це стосується підйомних механізмів).

Однак треба зауважити, що такі випробування можуть говорити лише про малоциклову втому, де пластична деформація відбувається у великих об'ємах металу, але ж ніяк не можна переносити ці міркування на багатоциклову втому, де пластична деформація відбувається у мікрооб'ємах металу.

Зміну КС у ненавантаженому стані автори пов'язують із появою пластичних деформацій. Далі робиться висновок, що за величиною КС можна однозначно

контролювати межу текучості, межу витривалості, ступінь розвитку явищ втоми у металі.

**MAGNETIC CONTROL OF FLAT SAMPLES FROM GRADES St3, St20, 09G2C
IN THE COURSE OF TENSILE TESTS WHEN COERCIVE FORCE WAS MEASURED
DIRECTLY UNDER THE LOAD AND UNLOADING**

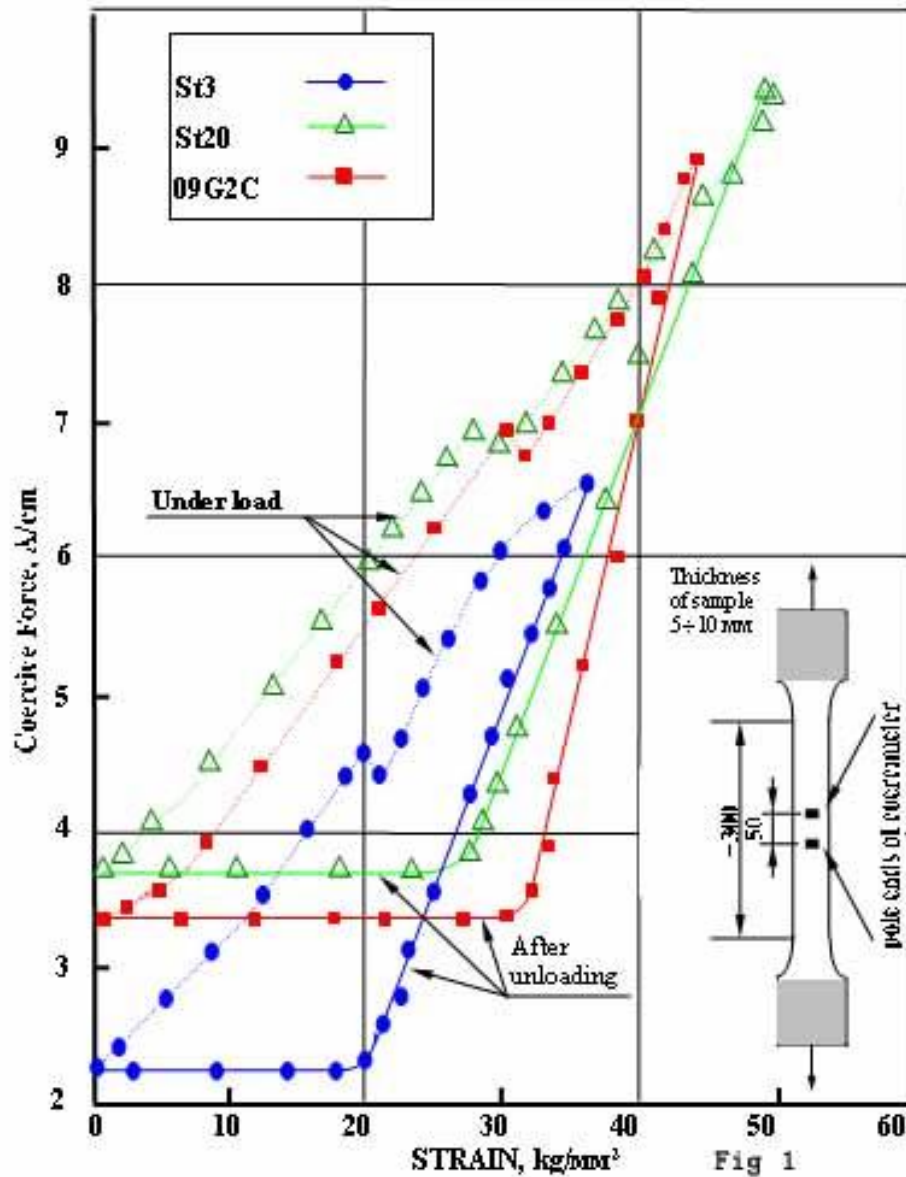


Рис. 1.7 Залежність КС від напружень [73, 74]

Крім того, навантажування зразків у пластичній зоні відбувалось по силі, а не по деформаціям, і не зрозуміло яких пластичних деформацій досягали (вісь абсцис градуйована у напруженнях). Дані про залежність контрольованих параметрів від пластичних нажаль деформацій відсутні.

**NOMOGRAMME FOR MAGNETIC CONTROL OF RESIDUAL RESOURCE
OF LIFTING DEVICES METAL PARTS IN ACCORDANCE WITH ISO 4301**

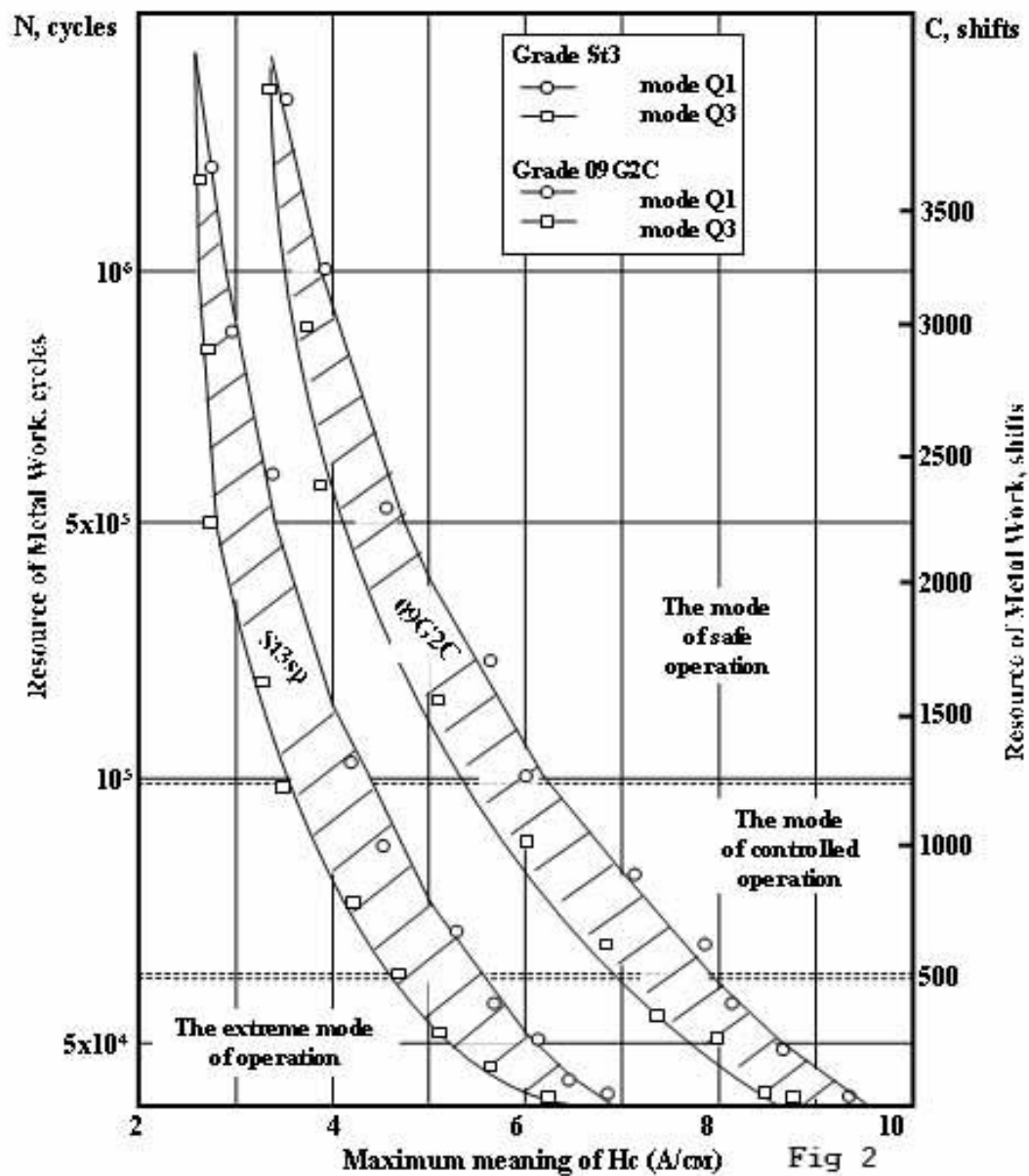


Рис. 1.8 Номограми для визначення режиму роботи крана

Треба зазначити, що межею малоциклової та багатоциклової втоми прийнято вважати 10^4 циклів навантаження. Як видно із рис 1.8 автори вийшли за цю межу, де навантаження вважається тільки у пружних деформаціях, і говорити про накопичення пластичних деформацій у великих об'ємах не коректно.

Схожий підхід до проведення випробувань зразків шляхом прикладення зусиль на стандартних розривних машинах використаний у роботі [73]. Експериментально отримані залежності магнітних властивостей сталей марок 17ГС, Ст3, Ст10, 14ХГС (коерцитивної сили H_c , анізотропії магнітної проникності) від величини механічних напружень σ в металі. З ростом величини напружень коерцитивна сила металу лінійно зростає в пружній і пластичній областях деформації (рис. 1.9), а магнітна анізотропія зростає до максимуму із подальшим зниженням (рис.1.10)

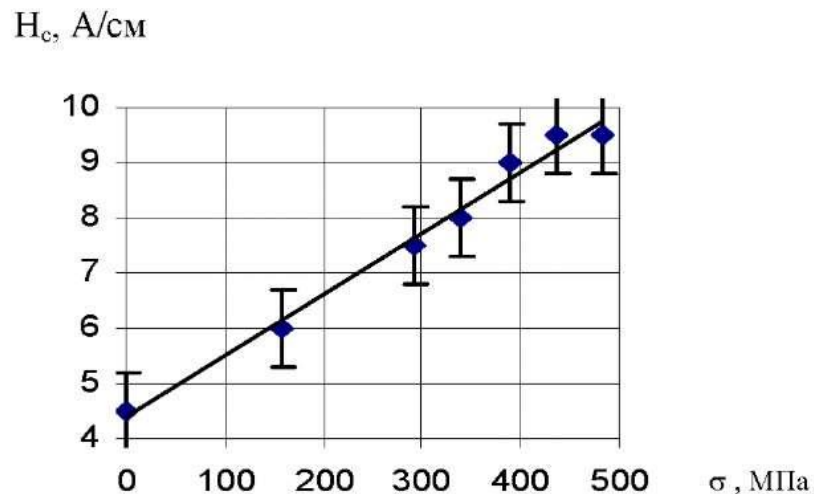


Рис. 1.9 Залежність коерцитивної сили металу від напружень в зразках трубної сталі 17ГС

Навантажування зразків у пластичній зоні відбувалось як і в попередньому випадку по силі, а не по деформаціям, і не зрозуміло яких пластичних деформацій досягали (вісь абсцис градуйована також у напруженнях). Дані про залежність контрольованих параметрів від пластичних також нажалі деформацій відсутні. Крім того це протиричить Бахареву [63].

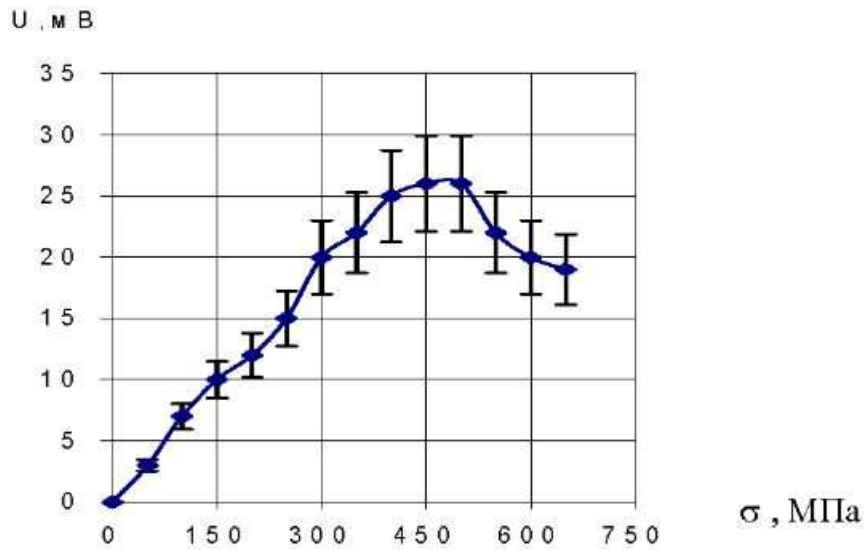


Рис. 1.10 Залежність величини магнітної анізотропії від механічних напружень в зразках трубної сталі 17ГС

Поява максимуму залежності магнітної анізотропії спостерігалась автором дисертаційної роботи при настанні межі текучості. Треба зазначити, що для сталі 17ГС вона складає 340 МПа [74], а не 450 МПа. Крім того, застосовувати звичайні зразки для досліджень у пружній області для навантаження в пластичній області не досить коректно. Після площадки текучості починається нагартування робочої зони зразка. Від тепер робоча зона має інші механічні властивості ніж інші зони зразка. Із подальшим навантаженням відбувається пластичне деформування неробочих зон зразка. Приймаючи до уваги, що пластична деформація завжди локалізована [75], у зразку виникають додаткові напруження, що врівноважують складний розподіл пластичних деформацій. Це значно впливає на результати досліджень.

Прохоров А.В. [76] проводив дослідження на малоциклову втому зразків зі зварним швом із сталей 09Г2С та ВСт3сп5. Отримали, що значення КС у металі шва більше ніж в основному металі, та зі збільшенням накоплених руйнувань втоми величина КС знижується у всіх зонах зварного шву. Зазначено, що поява

мікротріщин призводить до значного зниження густини дислокацій ρ , як наслідок, до різкого зниження КС.

З дані [77], що покази магнітного структуроскопа (вимірювання КС) однозначно залежать від величини залишкових механічних напружень металу, яка близька до лінійної залежності у всіх ділянках деформації металу (пружній, пружно-пластичній), впритул до руйнування сталюого виробу. Однак це протирічить також даним [63].

В роботі [78] показано, що в пружній області навантаження трубчастих зразків КС в напрямку деформування збільшується при стисненні та зменшується при розтягненні. Це підтверджує Бахарєва, але протирічить Гамідуліну [77].

У випадку пластичного стиснення після зняття відповідного навантаження [79] в значній частині зерен вздовж напрямку дії навантаження з'являються залишкові напруження розтягу, що призводить до різкого зменшення КС порівняно до її значення у навантаженому стані. Величина цього зменшення співпадає із величиною її приросту після знімання такого ж по величині розтягу.

В роботі [80] отримано, що при деформації 0,1-0,2% відбувається скачкоподібне зростання КС на 7-10%, при подальшому накопиченні пластичних деформацій КС монотонно зростає на 35% (до пластичної деформації 8%), подальше збільшення КС незначне, перед руйнуванням зразка КС різко зростає. Накопичення пластичної деформації під дією малоциклового навантаження призводить до зростання КС за рахунок збільшення дислокацій і внутрішніх мікронапружень, що призводять до перебудови доменної структури.

В роботі [81] зазначено, що залежності між характеристиками напружено-деформованого стану і магнітними є кореляційними і ґрунтуються на експериментальних даних. Такі кореляційні (градуовальні) залежності звичайно отримують на невеличких зразках, напружено-деформований стан яких істотно відрізняється від напружень та деформацій у елементах реальних конструкцій. Тому при використанні кореляційних залежностей, що отримані на невеличких зразках,

магнітні характеристики, які вимірюються при неруйнівному контролі, можуть розглядатися лише як індикаторні в точці дослідження. Більш достовірні кореляційні залежності можна отримати на крупнорозмірних зразках виробів, що досліджуються.

В роботі [82] показана принципова можливість оцінки ступеня пластичної деформації за вимірюваннями КС у всьому інтервалі, в той час як параметри магнітних шумів Баркгаузена застосовні для цих цілей в набагато меншому інтервалі ступенів деформації. Виявлена помітна зміна значень КС в області найбільш ймовірного руйнування деформованого зразка (в даному випадку явно виражені смуги ковзання) може бути підставою для оцінки залишкового ресурсу діючих сталевих конструкцій.

Зі збільшенням температури відпустку КС зменшується, а залишкова індукція і максимальна магнітна проникність збільшуються [83]. Це обумовлено зменшенням щільності дефектів кристалічної будови, в першу чергу, дислокацій, а також релаксацією внутрішніх напружень. Можна помітити, що КС зростає зі збільшенням макронапружень, а залишкова індукція і максимальна магнітна проникність - зменшуються.

Досліджено, що у сталевих канатах підвіски мостів [84] одновісні напруження розтягу призводять до звуження (зменшення КС) та збільшення куту нахилу у середніх полях граничної петлі гістерезису. Напруження стиснення призводять до зменшення куту нахилу петлі гістерезису, а також до зменшення індукції насичення, та збільшення КС (рис. 1.11).

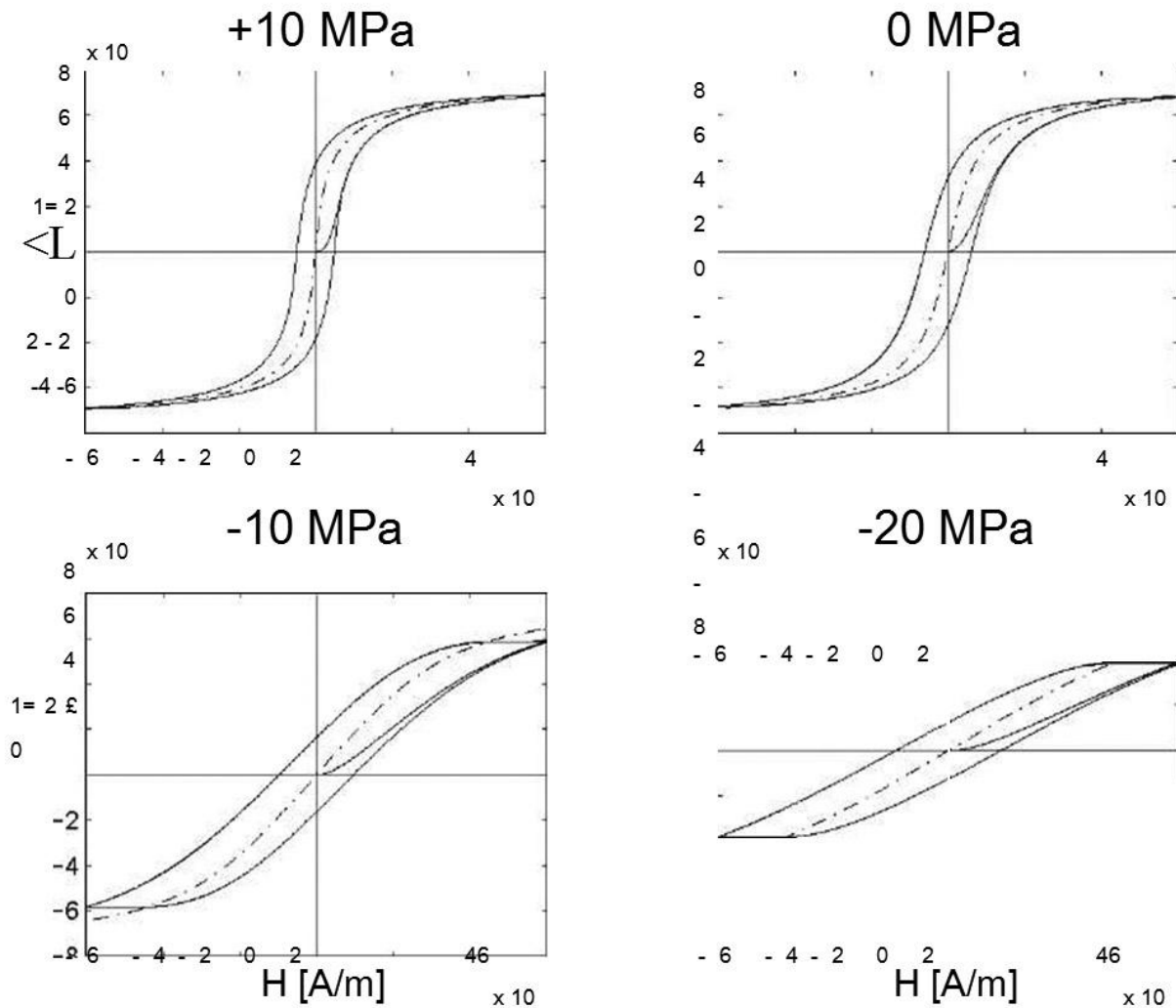


Рис. 1.11 - петлі гістерезису у сталевих канатах підвіски мостів

У роботі [85] пропонується оцінювати КС за сумою трьох складових:

$$H_{CT} = H_{CO} + H_{CB} + H_{CH}, \quad (11)$$

де H_{CO} – КС визначається хімічним складом та процесом виробництва металу;

H_{CB} – КС відповідає за накопичення незворотніх мікронапружень типу втоми;

H_{CH} – КС відповідає за зворотні (пружні) напруження будь-якого роду.

Із збільшенням терміну експлуатації H_{CB} безперервно зростає. Для режиму надійної експлуатації повинно виконуватись нерівність

$$H_{CT} < H_{CM},$$

де H_{CM} – КС, що характеризує межу міцності матеріалу.

У роботі [86] отримано, що по максимумах диференційної магнітної проникливості можна контролювати зміну структурного стану і механічних характеристик різних зон зварного з'єднання, а за величиною максимумів - судити про вклад цих зон. Показано, що зміна розмагнічуючого струму приставного електромагніту (в момент нуля поля намагнічування) та шумів Баркгаузена по ширині залежить від ширини зварного шва. По цим характеристикам можна визначити властивості металу зварного шва та зони біля шву. Амплітуда максимумів тангенціальної складової векторам магнітної індукції також корелює із шириною зварного шва. Недоліками даної роботи можна назвати нехтування ЗЗН, що є невід'ємною складовою зварних з'єднань. Адже при вирізанні зразків та зменшенні їх ширини вивільняються напруження, отже ЗЗН змінювались не контрольованим образом. Тому дані отримані в цій роботі важко використовувати у практичних дослідженнях.

Бондаренко А.Ю. [87] запропонував розглядати зварне з'єднання з точки зору фізики магнітних явищ як ряд зон з різною магнітною жорсткістю (коерцитивною силою H_c), розташованих перпендикулярно напрямку діючого магнітного поля (рис. 1.12). Виходячи з цього, дано аналітичний вираз КС зварного з'єднання:

$$H_c^{зв.з} = \frac{l_{ш}}{l_{ш} + 2l_{ом} + 2l_{зтв}} H_c^{ш} + \frac{2l_{ом}}{l_{ш} + 2l_{ом} + 2l_{зтв}} H_c^{ом} + \frac{2l_{зтв}}{l_{ш} + 2l_{ом} + 2l_{зтв}} H_c^{зтв}, \quad (12)$$

де $l_{ш}$ - розмір зони зварного шва;

$l_{зтв}$ - розмір ЗТВ;

$l_{ом}$ - розмір зони основного металу (ОМ) у магнітному ланцюгу пристрою;

$H_c^{ш}$, $H_c^{зтв}$, $H_c^{ом}$ - величина КС відповідно зварного шва, ЗТВ та ОМ.

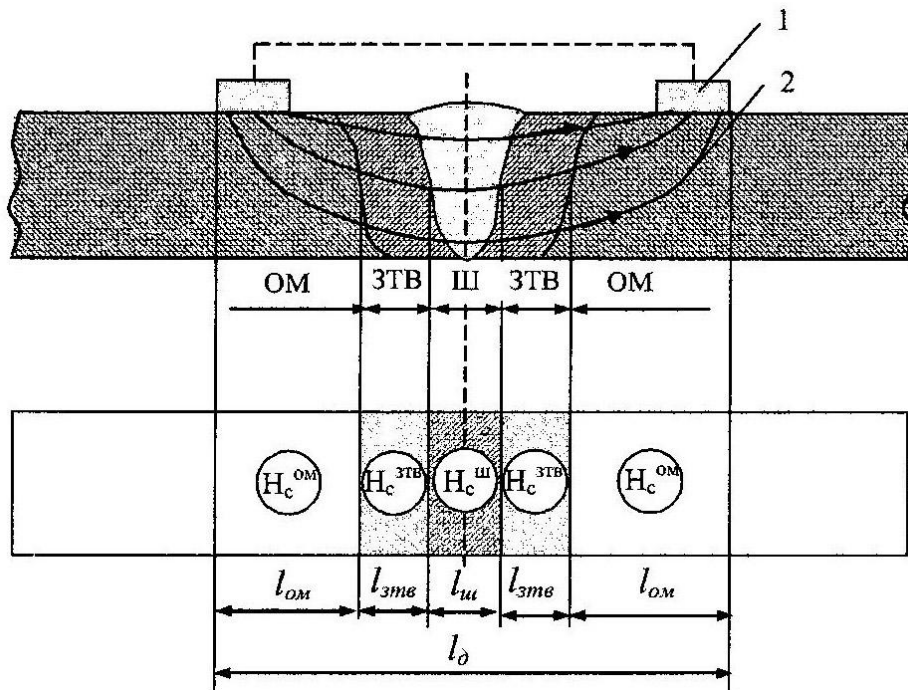


Рис. 1.12 Схема зварного з'єднання з зонами різної магнітної жорсткості: 1 – магнітна система; 2 – магнітні силові лінії; $l_{\text{д}}$ – розмір бази виміру [91]

Запропоновано схему поперечного сканування ЗТВ зварного з'єднання за допомогою пристрою магнітного контролю і вираз для визначення величин коерцитивних сил $H_c^{\text{ш}}$ і $H_c^{\text{зтв}}$ у перетині зварного з'єднання і розміру $l_{\text{зтв}}$.

При цьому величина $H_c^{\text{зтв}}$ визначається таким чином:

$$H_c^{\text{зтв}} = \frac{(H_c^{\text{зтв}+\text{ом}} - H_c^{\text{ом}}) l_{\text{д}} + H_c^{\text{ом}} l_{\text{д}}}{l_{\text{зтв}}}, \quad (13)$$

де $H_c^{\text{зтв}+\text{ом}}$ – величина коерцитивної сили в ЗТВ і зоні ОМ.

Зварне з'єднання моделювали у вигляді багат шарового зразка, складеного з пластин (розмір $9 \times 40 \times 60 \text{ мм}$), щільно притиснутих одна до одної.

Аналіз отриманих результатів досліджень показав, що величини коерцитивних сил $H_c^{36.3}$ і $H_c^{\text{ом}}$, виміряні як під кутом 0° , так і під кутом 90° по відношенню до прикладеного одновісного навантаження, найбільш чутливі до пластичних деформацій, менших за 2 % (рис. 1.13, 1.14) [91].

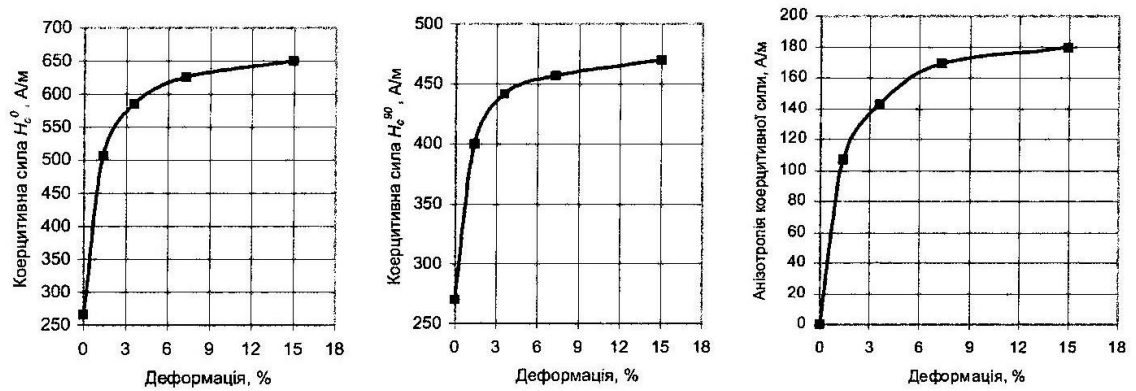


Рис. 1.13 Залежність КС основного металу (сталь 10Г2С) від залишкових пластичних деформацій при одновісному навантаженні

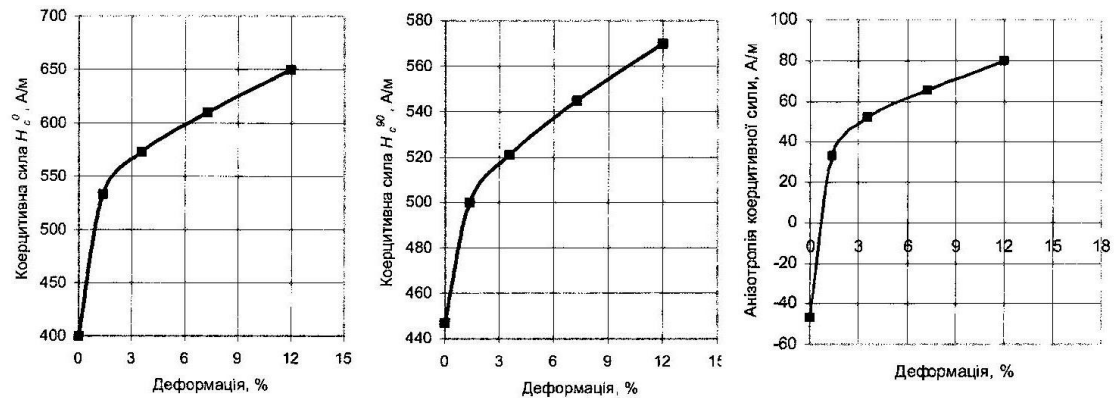


Рис. 1.14 Залежність КС зварного з'єднання (сталь 10Г2С1) від залишкових пластичних деформацій при одновісному навантаженні

Як видно, що при використанні по осі абсцис деформації, а не напружень, графіки мають нелінійний характер.

Зазначено, що при досягненні критичного значення щільності дислокацій величина КС в зоні руйнування зварних зразків збільшилася в 2,4 рази в поздовжньому напрямку й у 1,7 рази в поперечному у співставленні з величиною КС на ділянці, що не зазнала деформації [91].

Аналіз отриманих результатів досліджень показав, що при навантаженні зварних трубчастих зразків тиском, що відповідає напруженню, яке не перевищує межу пружності, і наступному знятті навантаження величини коерцитивних сил $H_c^{36.3}$ і $H_c^{3\pi\theta+0\pi}$ змінюються по тим самим залежностям. Навантаження зварних трубчастих

зразків тиском, що викликає пластичне деформування металу, приводить до зміщення кривих $H_c^{36.3} = f(P_{вн})$ і $H_c^{3тв+ом} = f(P_{вн})$ при розвантаженні і наступному навантаженні, і, як наслідок, до зростання величини коерцитивних сил $H_c^{36.3}$ і $H_c^{3тв+ом}$ у розвантаженому стані [91].

Визначення граничних значень КС виконується в процесі випробувань зразків-свідків. Зразки повинні відповідати зварним з'єднанням трубопроводу, що обстежуються. Тому для таких зварних зразків-свідків доцільно використовувати труби аварійного запасу обстежуваного трубопроводу, що практично зробити досить складно для багатьох ЗК.

Показано, що для монокристалу заліза [88, 89] при напруженнях від 0 до 115 МПа та низьколегованої сталі А533В при напруженнях від 0 до 633 МПа росте КС та зменшується індукції насичення та залишкова (рис. 1.15). З метою зменшення ступеню намагнічування матеріалу запропоновано визначати КС та магнітну сприйнятливність при полях менших від насичення та перераховувати отримані дані за наведеними залежностями.

Досліджено змінення КС при двовісній асиметричній [90] (розтяг – стиснення) циклічній деформації хрестоподібних зразків із сталі Ст3 у пружній області деформацій. Отримано, що залежності поздовжньої та поперечної КС при циклічному навантаженні пластично-деформованих зразків мають гістерезис. Зазначено, що при відомих напрямках розтягу та стиснення по залежностям поздовжньої та поперечної КС можна визначити ступінь пластичної деформації вуглецевих сталей.

Досліджено вплив двовісних пружних деформацій виду [91] «розтяг-стиснення» та «розтяг-розтяг» на КС хрестоподібних зразків Ст3 та 09Г2С. Зазначено, що при оцінці напруженого стану по результатам вимірювання КС виникає неоднозначність якщо вид пружних деформацій заздалегідь невідомий. Метод не реагує на двовісні напруження «розтяг-розтяг».

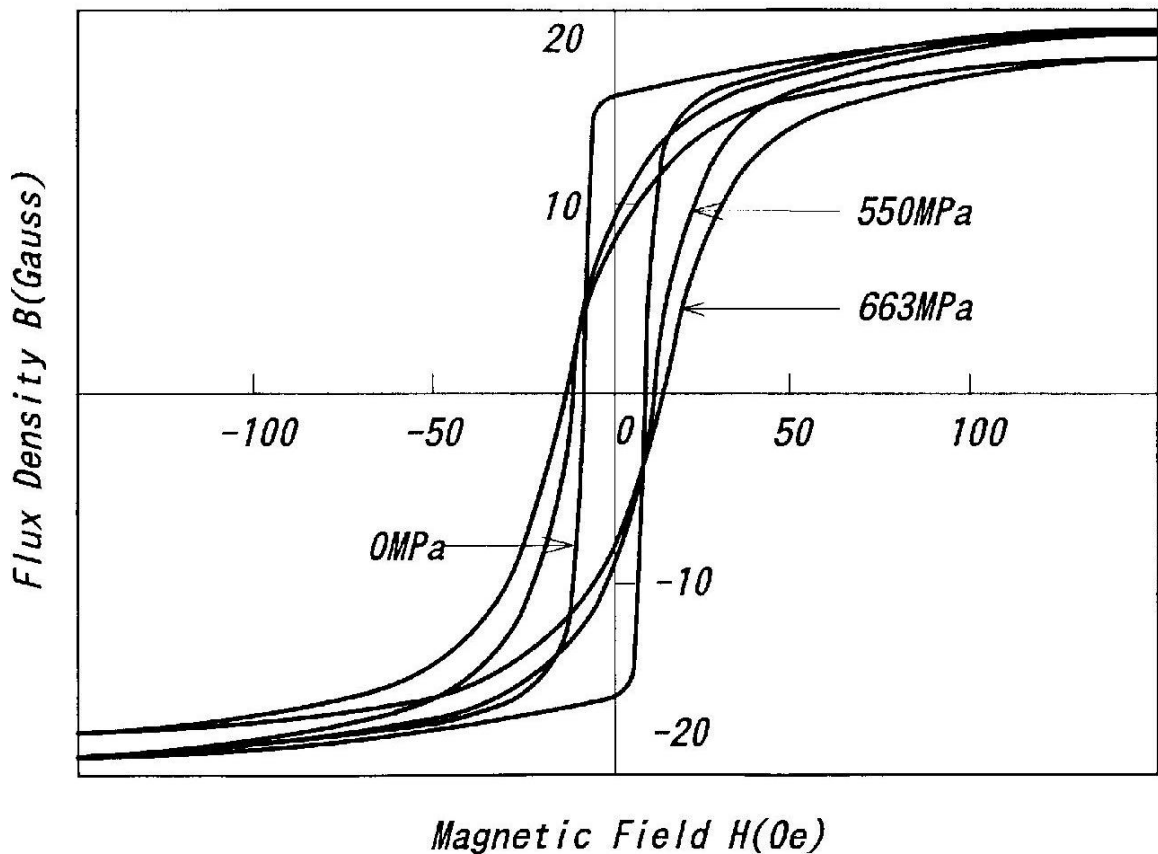


Рис. 1.15 Петлі магнітного гістерезису

Досліджено зміну КС під дією пружних та пластичних деформацій в умовах двовісного симетричного навантаження [92] розтягуванням хрестоподібних зразків сталі Ст3 та Х70. Під дією двовісної симетричної деформації КС сталі Ст3 залишається ізотропною та монотонно зростає. Характер змінення КС залежить від ступеню двовісної пластичної деформації. По мірі зростання пружних деформацій КС зростає для зразків із малою та зменшується для зразків із великою ступеню пластичної деформації. При цьому загальні зміни КС в межах пружних циклів навантаження є незначними та зменшуються із ростом пластичної деформації.

Основним недоліком методу КС є те, що він працює на постійних полях і вимірювання КС займає до 7 секунд. Це значно ускладнює сканування зварних конструкцій з метою пошуку найбільш небезпечних ділянок.

1.4.3 Вимірювання втрат на перемагнічування

Автори [93] вважають, що сигнал із вимірювальної обмотки пропорційний втратам на перемагнічування. Це твердження не є справедливим. Зазначено, що магнітні властивості феромагнетиків сильно залежать від магнітної передісторії. Тому автори проводили вимірювання на повністю розмагнічених зразках, що не відповідає матеріалу реальних ЗК. Виявлено монотонна залежність втрат перемагнічування від напружень стиснення-розтягування. Криві залежності вихідного сигналу датчика втрат перемагнічування від напружень наведені на рис. 1.16.

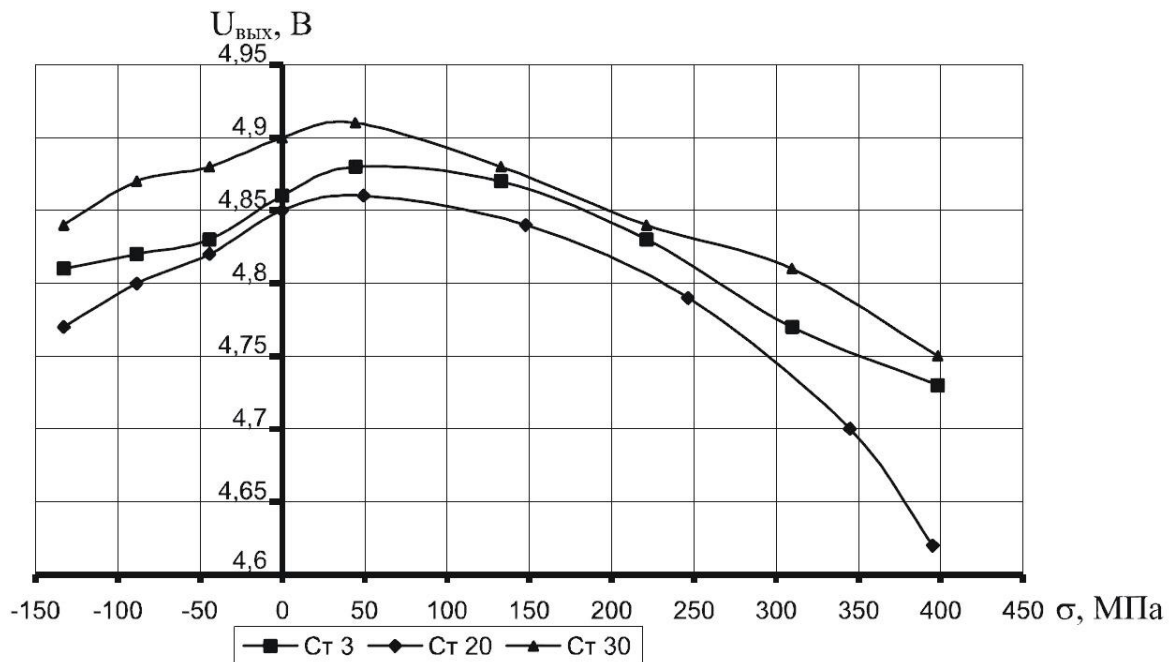


Рис. 1.16. Залежність вихідного сигналу перетворювача втрат перемагнічування від напружень

$U_{\text{ВВХ}}$ - амплітуда вихідного сигналу перетворювача; σ – механічні напруження

Крім того були зварені зразки із сталі 17ГС електрошлаковом та ручним дуговим зварюванням у різних просторових положеннях. Вимірювання проводили поперек зварного з'єднання із кроком 10 мм. Дослідження показали зменшення

величини показів на зварному шві. Автори прийшли до висновку, що вплив процесів перерекристалізації на сигнал перетворювача більше ніж вплив напружень.

Запропоновано перетворювач [94] у вигляді приставного електромагніту із двома полюсами та двома обмотками 9 (рис. 1.17). На намагнічуючу обмотку подавали синусоїдальний сигнал частоти 25 Гц. Із вимірювальної обмотки знімали корисний сигнал. Останній оброблявся на аналізаторі спектру. Визначали коефіцієнт гармонік та вищі гармоніки.

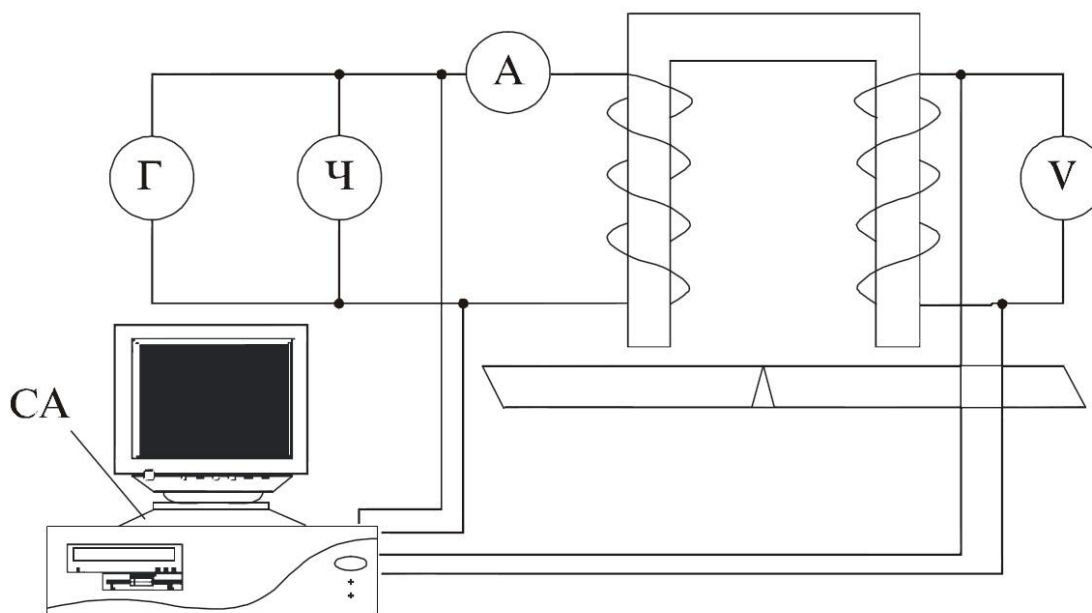


Рис. 1.17 Схема вимірювання втрат на перемагнічування

Г – генератор звукової частоти ГЗ-34; Ч – частото метр ЧЗ-32; А, V – амперметр та вольтметр типу Щ-4313; СА – спектральний аналізатор SpectralLAB 4.32.

При роботі на основній гармоніці струм піддержували постійної величини. Криві залежності вихідного сигналу перетворювача втрат перемагнічівання від напружень наведені на рис.1.16.

Про можливість використання параметрів перемагнічування для контролю якості термообробки сталених виробі вказував і Міхєєв М.Н. [95]. Він запропонував використовувати магнітні поля частотою 50-100Гц.

1.4.4. Електрорезистивний метод

Ґрунтується на зміні електричного опору від механічних напружень. Показано [96], що при напруженнях розтягу-стиснення при чистому так і простому вигині залежність лінійна та прямо пропорційна. Показано, що для немагнітних матеріалів залежність відсутня, що на думку автора, підтверджує, що саме магнітна проникливість є головним чинником. Останнє твердження протирічить даним [97].

У авіаційній галузі метод вимірювання електроопору визнається достатньо чутливим та тим, що дозволяє оцінити пластичну деформацію, плинність металів і сплавів, дефекти у кристалах та точкові дефекти у металах, а також провести мікромеханічні дослідження властивостей матеріалів [86].

У роботі проведено дослідження на зразках із сталі 09ХГСЮЧ, Ст 3 та 15ХСНД при трьохточковій формі навантаження для створення напружень розтягу. Електроди приєднували способом точкового зварювання-паяння. Автори отримали залежність, яка показує лінійне збільшення опору від напружень розтягу до початку текучості. Залежності подібні рис.1.10.

Зміна електричного опору відбувається у невеликих межах при великій електропровідності сталей, що призводить до значних похибок. Крім того метод вимагає зняття покриття, підготовки поверхні та надійного електричного контакту. На даний час метод не знайшов практичного застосування на реальних конструкціях.

1.4.5 Метод магнітної пам'яті металу

Метод магнітної пам'яті - метод неруйнівного контролю, заснований на аналізі розподілу власного магнітного поля розсіювання на поверхні виробів з метою визначення зон концентрації напружень, дефектів і неоднорідності структури металу і зварних з'єднань. Шляхом вимірювання власного магнітного поля розсіювання, яке відображає залишкову намагніченість, що сформувалася природним чином в процесі

зварювання, пропонується виконувати оцінку фактичного стану зварного шва (дефекти, напруження) [98, 99, 100, 101].

Пояснюється, що більшість металоконструкцій і обладнання, виготовлених з феромагнітних матеріалів, під дією робочих навантажень схильні до "самонамагнічування" в магнітному полі Землі. Про те промислові магнітні поля (наприклад при зварюванні) на декілька порядків перевищують поле землі, що призводить випадковості залишкової намагніченості. Можливо в умовах серійного виробництва можна іншими методами відібрати придатні та непридатні зразки і створити методику вибракування. Однак для визначення напружено-деформованого стану ЗК метод застосовувати поки ще рано.

1.4.6 Комплексні електромагнітні методи

Dobmann G. запропонував метод ЗМ (Мікромагнітний, Багатопараметричний, Мікроструктурний та визначення напружень) [102] для аналізу ступеня деградації механічних властивостей сталей та відповідної мікроструктури, що впливає на міцність та в'язкість. Використовується гармонічний аналіз петлі гістерезису та магнітошумовий з метою знаходження КС, досліджується магнітострикція матеріалу та проводиться визначення магнітоакустичної емісії.

Експериментально проводять дослідження вказаних параметрів для отримання градувальник характеристик. Потім проводять перевірку отриманих залежностей на нових зразках. Вказано, що механічні напруження значно ускладнюють розшифровку отриманих результатів. Тобто метод добре працює або на мікроструктуру, або на напруження.

В роботі досліджено зміни петлі магнітного гістерезису від фазового складу сталі та напружень стиснення та розтягу (рис. 1.18, 1.19). Помітно, що мартенсит (як напруження стиснення) зменшує магнітну жорсткість, а ферит (як і напруження

розтягу) її збільшує. Дослідженням напружень у пластичній зоні зварних з'єднань автор не займається.

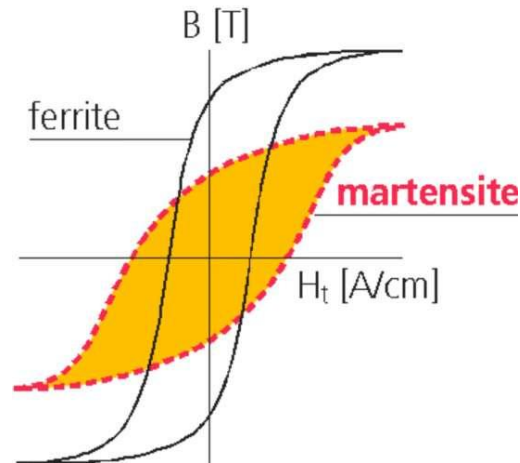


Рис. 1.18. Вплив мікроструктури на петлю гістерезису [103]

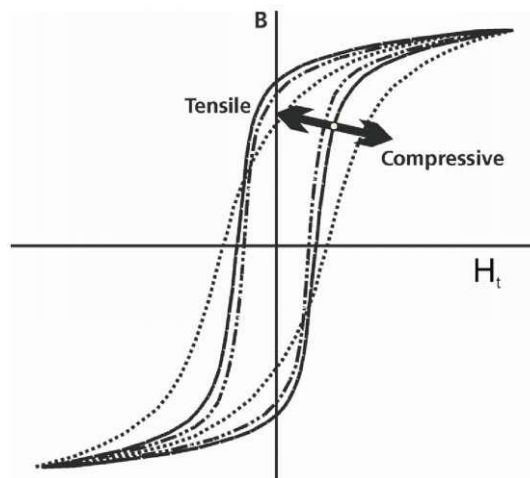


Рис. 1.19. Вплив механічних напружень на петлю гістерезису [103]

В роботі [103] запропоновано визначати електромагнітні параметри металу трубопроводів. Підібрано оптимальні частоти намагнічування для оцінки граничного стану сталей: : сталь 10 (19 мкм), сталь 20 (15 мкм) - 500-800 Гц; сталь 45 и 65Г - 500-700 Гц; сталь 10 (28 мкм, 32 мкм), сталь 20 (25 мкм, 35 мкм) - 400-700 Гц. Головна перевага запропонованого методу полягає в можливості обліку інформації про матеріал (розмір зерна, вміст вуглецю), виду навантаженості конструкції (статичне, малоциклової) при оцінці граничного стану металу, що є важливим етапом при визначенні терміну безпечної експлуатації устаткування. Запропонована

методика визначення межі переходу металу у пластичну область відповідає граничному стану металу, що для трубопроводів є граничним станом.

В роботі [104] зауважено, що багато параметрові методи неруйнівного контролю ефективні тільки тоді, коли між контрольованими параметрами відсутня взаємна кореляція. Як що вона є, то статистична вага результату неруйнівного контролю розподіляється по контрольним параметрам, в результаті відгук контрольованої характеристики на зміну контрольованого параметра істотно знижується. Величина КС обумовлена затримкою незворотних процесів при перемагнічуванні матеріалу. За теоретичними і експериментальними дослідженнями затримка процесів перемагнічування може здійснюватись не феромагнітними включеннями (або пустотами) різних розмірів, дисперсності та концентрації, градієнтами напружень, що обумовлені дислокаціями різної густини, границями блоків тощо. КС залежить від розмірів зерен в полікристалічних феромагнетиках. Виразів, що відображають залежність КС від виду, форми та дисперсності різних дефектів, багато. Досліджували КС, намагніченість насичення, релаксаційну намагніченість та магнітну сприйнятливність. КС магнітом'яких матеріалів чутлива до факторів, що затримують зміщення доменних границь. Із багатьох одночасно структурних процесів, що протікають при технологічній обробці, можливо коли одні фактори компенсують вплив інших та КС виявляється не чутливою до технологічного режиму чи навіть змінюється монотонно. У цьому випадку необхідно залучати інші магнітні властивості, які мають відмінну структурну та фахову чутливість.

У роботах [105, 106, 107] вказано, що у багатьох випадках є недосконалими методи контролю технічного стану трубопроводів за окремими параметрами. Істотними чинниками, які необхідно враховувати для цього, є відсутність аналітичного (формульного) зв'язку між інформативними параметрами, що можуть бути визначені сучасними засобами контролю та цільовими характеристиками, котрі визначають безпечність експлуатації металоконструкції; складність оцінки

сукупного та індивідуального впливу інформаційних параметрів на характеристики технічного стану досліджуваних об'єктів; відсутність методології підбору комплексу інформаційних параметрів, у тому числі : нових, що використовуються для вирішення конкретних завдань технічної діагностики та неруйнівного контролю.

Існують підстави стверджувати, що застосування нейронних мережових технологій у неруйнівному контролі містить значний потенціал для підвищення достовірності результатів обстежень та поглиблення наукових досліджень за даним напрямком [108].

Частина дослідників також схиляється до використання багатопараметрових магнітних методів [109, 110].

1.5 Магнітоанізотропний метод контролю механічних напружень

Магнітоанізотропний метод контролю механічних напружень розроблений і розвинутий у роботах Ю.А. Мехонцева, Г.Т. Орехова, М.Н. Гуманюка, Е.С. Левшиної, І.М. Жданова, С.К. Фомічова, В.В. Батюка. Метод ґрунтується на використанні магнітопружного ефекту - зміні магнітних характеристик у результаті деформації феромагнітного матеріалу. Оскільки всі основні конструкційні сталі - феромагнітні, то немає принципових обмежень для застосування магнітопружного методу. Донедавна основним недоліком, що обмежував застосування методу, був значний вплив зміни немагнітного проміжку між перетворювачем та поверхнею виробу на результати вимірювань. Використання диференційних перетворювачів дозволило ліквідувати цей недолік і дозволяє працювати в реальних умовах без підготовки (шліфування) поверхні. Достатньо поверхню металу відчистити від бруду, нашарування іржі та окалини. Ці властивості роблять магнітопружний метод одним із найбільш перспективних із методів визначення механічних напружень у ЗК.

Магнітопружний ефект представляє собою зміну намагніченості металу від напружень і є зворотнім ефектом до магнітострикції [111].

Намагнічування феромагнетику відбувається спочатку шляхом зсуву доменних границь (слабкі поля), далі додається обертання доменів (середні поля) та у подальшому залишаються тільки обертання доменів (сильні поля). Так як для зсуву та обертання доменів потрібна енергія при зменшенні поля процеси йдуть зворотно, але із запізненням. Так з'являється петля магнітного гістерезису.

Немає особливої різниці для магнітопружного ефекту, які зусилля спричинили його – внутрішні чи зовнішні [112, 113]. Відомо, що у маловуглецевих та низьколегованих сталях домени розташовуються віссю найлегшого намагнічування вздовж напружень розтягу. Деформації кристалічної гранки викликають внутрішні напруження, які намагаються повернути тіло у стан рівноваги [114]. Це спричиняє зміну (поворот) вектора спонтанної намагніченості \vec{M}_S [115].

Розміри та рух доменів значно залежать від дефектів кристалічної гранки (включень, вакансій, дислокацій, тощо) та структурних неоднорідностей (границь кристалів, та їх розмірів і форм у полікристалі). Це призводить, як вже зазначалось, до петлі магнітного гістерезису та структурної чутливості феромагнетиків [51, 116, 117].

При механічному навантаженні відбувається така зміна магнітних доменів, як і при зміні магнітного поля. Ті ж самі чинники перешкоджають руху та повороту доменних границь. Отже поруч із магнітним гістерезисом з'являється ще й магнітомеханічний гістерезис. Два гістерезиса (магнітний та магнітомеханічний) в купі із нелінійністю градувальник характеристик створюють похибки при визначенні напружень.

У 1957 році Ю.Я.Мехонцев запропонував 4- полюсний магнітоанізотропний перетворювач, якій має дві обмотки (вимірювальну та намагнічуючу) на П-подібних осердях, що розташовані ортогонально один від одного [118]. На намагнічуючу обмотку W_1 (Н-Н рис.1.20 а) подається струм змінної напруги, що спричинює появу магнітного потоку Φ . У разі ізотропності металу, на який встановлюється перетворювач, цей магнітний потік замикається між полюсами H_1 - H_2 намагнічуючої

катушки W_1 . При появі магнітної анізотропії (напруженнях розтягу σ) магнітна проникливість вздовж напрямку дії напружень зростає. Магнітний потік Φ розкладається на дві складові Φ_1 та Φ_2 (рис. 1.20 б). Потік Φ_1 (з першої ніжки H_1 проходить вздовж дії напружень до осердя вимірювальної катушки B_1 . Далі через вимірювальну катушку W_2 потік виходить через другу ніжку осердя B_2 , а потім знову - вздовж напружень до другої ніжки H_2 намагнічуючої обмотки W_1 . Потік Φ_2 (з першої ніжки H_1 проходить поперек дії напружень до осердя вимірювальної катушки - ніжку B_2 . Далі через вимірювальну катушку W_2 потік виходить через першу ніжку осердя B_1 , а потім знову - вздовж напружень до другої ніжки H_2 намагнічуючої обмотки W_1 . Видно, що обидва потоки Φ_1 та Φ_2 проходять через вимірювальну катушку W_2 у різних напрямках. Це призводить до віднімання сигналів від потоків Φ_1 та Φ_2 , а самі ці потоки проходять ортогонально через метал, що досліджується. Ця обставина (віднімання сигналів від ортогональних потоків) призводить до малої чутливості перетворювача до немагнітного зазору та нечутливості до структурних змін металу (складова від останніх компенсується у вимірювальній обмотці). Це дозволяє працювати перетворювачу по немагнітних покриттях (до 0,3 мм) та робить нечутливим до стану поверхні.

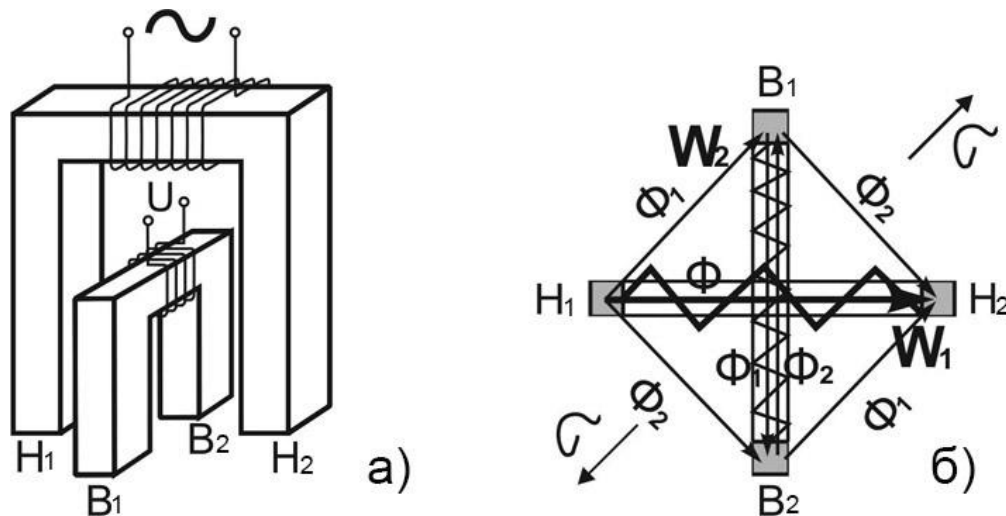


Рис. 1.20 - Чотирьохполюсний диференційно-трансформаторного перетворювач: а) розташування обмоток, б) – розподіл магнітних потоків

В роботі [119] дослідження проводили 4-х полюсним магнітоанізотропним перетворювачем. Вихідний сигнал перетворювача на розтягу-стисненню при навантаженні зразка на «чистому вигині» показав симетричну та нелінійну залежність від напружень рис. 1.21.



Рис. 1.21 Залежність сигналів 4-х полюсного магнітоанізотропного перетворювача від напружень

Також проводили дослідження при консольному вигині труби 426x14 мм. В трубі діяли значні залишкові напруження (рис. 1.22). При додаванні напружень від вигину залишкові напруження розтягу компенсувались напруженнями стиснення і навпаки (рис. 1.22)

На рис. 4 в виде лепестковых диаграмм показано изменение напряженного состояния в одном из контрольных сечений трубы 426×14 мм под действием изгибной нагрузки. Распределение остаточных напряже-

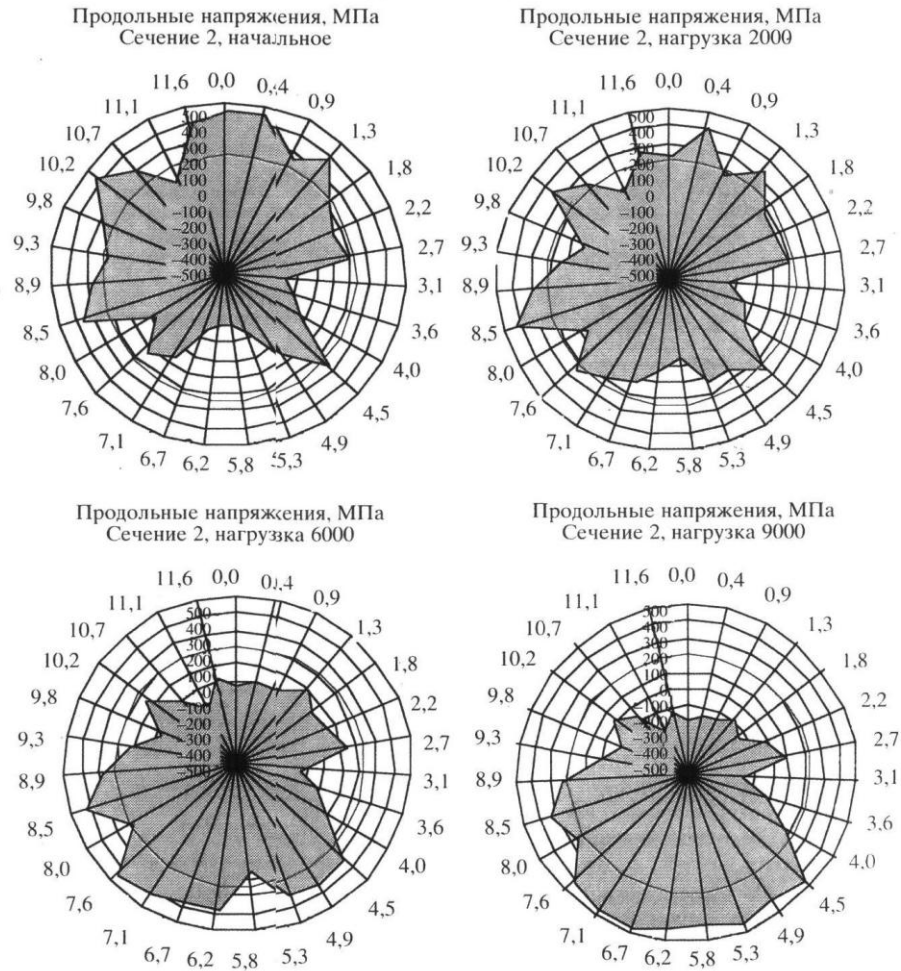


Рис. 4. Изменение картины распределения напряжений по периметру трубы 426×14 мм при ее изгибе в направлении 0—6 ч нагрузкой 2000, 6000 и 9000 кгс.

ний (до испытаний) в контрольном сечении неоднородно; нагружение домкратом приводит к росту растягивающих напряжений в направлении

Рис.1.22 Зміна картини розподілу напружень по діаметру труби 426х14 мм при її вигинанні в напрямку 0-6 часів навантаженням 2000, 6000 та 9000 кгс.

На діаграмах видно класичну зміну розподілу напружень одного вигину на інший.

У роботі [121] показано, що сигнал магнітоанізотропного перетворювача при обертанні являє собою синусоїду (рис. 1.23)

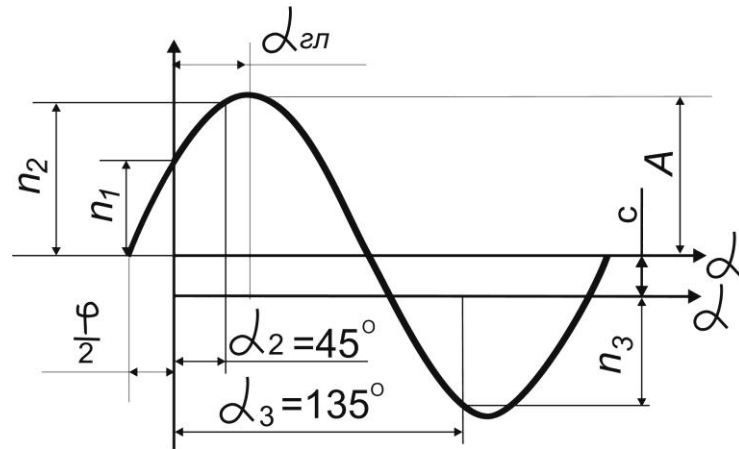


Рис. 1.23 Залежність сигналу магнітоанізотропного перетворювача від кута повороту α [121]

Для чотирьохполюсного магнітоанізотропного перетворювача отримано [120] амплітуду A , початкову фазу ГЗ φ , різницю нормальних $\sigma_y - \sigma_x$ та дотичні τ_{xy} напруження:

Визначення поздовжніх напружень лінійної частини зварних магістральних трубопроводів запропоновано отримувати за допомогою розрахунків поперечної компоненти. Кільцеві напруження від внутрішнього тиску розраховують за формулою Лапласа. Знаючи положення площадок головних напружень (поздовжні та кільцеві напруження), отримуємо поздовжні напруження на віддаленні від зварних швів [121]:

$$\sigma_m = \frac{2}{T}(A_1 - A_0) + \frac{pD}{2h_D} \quad (14)$$

де A_1 – амплітуда ГЗ, що отримана на віддаленні від зварних швів; A_0 – початкова амплітуда ГЗ (початковий показ); p – внутрішній тиск у трубопроводі; D – діаметр труби; h_D – товщина стінки труби.

При роботі магнітоанізотропного перетворювача завжди вважалось, що фаза корисного сигналу змінюється кратно 180° . Однак це відбувається не зовсім так. У роботі [121] показано зміни фази на величину не кратно 180° . З метою усунення спотворень інформативного сигналу перетворювача при зміні фази сигналу на

величину не кратну 180° запропоновано до складу традиційного приладу додатково додати вольтметр змінного струму. У розрахунковий блок поступає два сигнали: U_1 із фазочутливого випрямляча та U_2 вольтметру змінного струму. Розрахунковий блок визначає остаточний сигнал U_3 за співвідношенням: $U_3 = U_2$, при $U_1 \geq 0$, $U_3 = -U_2$, при $U_1 < 0$, [121].

Однак зміна фази сигналу може бути додатковим інформаційним сигналом та потребує подальшого дослідження.

Учанін В.М. та Мінаков С.М. [122] отримали дані на сталі 65Г, що сигнал магнітоанізотропного перетворювача не залежить від структури сталі. Автори проводили розтягування зразків у стані відпалу та загартування (рис. 1.24). Отримані залежності збігаються.

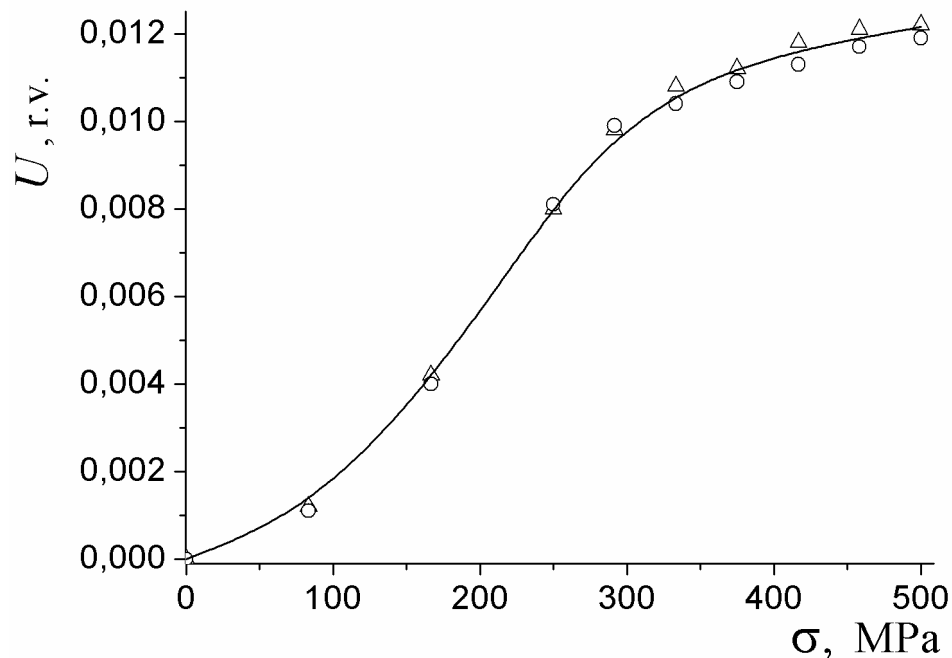


Рис. 1.24 Залежність сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень розтягу у відпаленому (Δ) і гартованому (\circ) станах сталі 65Г [124]

Шель М.М. проводив дослідження визначення напружень методами гармонічного аналізу [123, 124]. Однак його дослідження не поширювались на область, де мали місце пластичні деформації або діють ЗЗН.

Відома робота [125], у якій запропоновано використовувати вищі гармонічні складові електрорушійна сила накладного перетворювача для аналізу напружено-деформованого стану листових матеріалів. Однак ці дослідження не поширювались на ЗЗН.

Висновки до розділу 1

А) В наявності дані різних дослідників, що протирічать одне одному. Це можна пояснити різними умовами навантаження зразків (напруження, деформації).

В) Метод коерцитивної сили чутливий до пластичних деформацій та напружень. Необхідно провести свої власні дослідження на пластично-деформованих, а потім – на навантажених зразках.

С) Обладнання для пластичного деформування повинно створювати контрольоване деформування напруження навантаженню у наявних розривних машинах.

Д) На теперішній час найбільш придатним для визначення напружень зварних конструкцій є магнітоанізотропний метод.

Е) Метод коерцитивної сили потребує вдосконалення для можливості безперервного сканування зварних конструкцій (як магнітоанізотропний).

Ф) Визначення одночасно напружень та пластичних деформацій потребує вимірювання додаткових параметрів, які можуть бути для магнітоанізотропного методу амплітудами гармонік та фазою першої гармоніки.

Г) Зразки для досліджень на пластичне деформування повинні мати неробочі зони такими, щоб в них не проходило пластичне деформування.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ

2.1 Вибір матеріалу для проведення досліджень

В якості матеріалу для проведення досліджень вибрано листову сталь марки 09Г2С.

Найчастіше прокат з даної марки сталі використовується для різноманітних будівельних конструкцій завдяки високій механічній міцності, що дозволяє використовувати більш тонкі елементи ніж при використанні інших сталей. Стійкість властивостей сталі 09Г2С в широкому температурному діапазоні дозволяє застосовувати деталі з цієї марки в діапазоні температур від -70 до $+450^{\circ}\text{C}$. Також легка зварюваність дозволяє виготовляти з листового прокату цієї марки сталі складні конструкції для хімічної, нафтової, будівельної, суднобудівної та інших галузей. Застосовуючи загартування і відпускання цієї марки сталі, виготовляють якісну трубопровідну арматуру. Висока механічна стійкість до низьких температур також дозволяє з успіхом застосовувати труби з 09Г2С у північних районах.

Хімічний склад у % сталі 09Г2С наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As	Si
до 0.12	0.5 - 0.8	1.3 - 1.7	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.3	до 0.008	до 0.3	до 0.08	до 0.12

Закордонні аналоги матеріалу 09Г2С наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Германія	Японія	Китай	Болгарія	Венгрія	Румунія
DIN, WNr	JIS	GB	BDS	MSZ	STAS
13Mn6 9MnSi5	SB49	12Mn	09G2S	VH2	9SiMn16

Механічні властивості листового прокату за ГОСТ 5520-79:

- межа витривалості $\sigma_B = 430-490$ МПа;
- межа текучості $\sigma_T = 265-345$ МПа;
- відносне подовження при розриві δ_5 21%;
- ударна в'язкість КСУ 590-640 кДж/м²

Ця марка сталі широко використовується для зварних конструкцій. Зварювання може виконуватися як без підігріву, так і з попереднім підігрівом до 100-120° С. Так як вуглецю в сталі мало, то зварювання її досить просте, причому сталь не гартується і не перегрівається в процесі зварювання, завдяки чому не відбувається зниження пластичних властивостей або збільшення її зернистості. До плюсів застосування цієї сталі можна віднести також, що вона не схильна до відпускнуї крихкості і її в'язкість не знижується після відпустки. Вищенаведеними властивостями пояснюється зручність використання 09Г2С від інших сталей з великим вмістом вуглецю або присадок, які гірше зварюються та змінюють властивості після термообробки.

2.2 Методика досліджень сигналів методів МА та ПП на плоских зразках

Аналіз сучасного стану електромагнітних методів дослідження напруженого стану показав, що перспективними для вирішення поставленої мети є два методи: магнітоанізотропний (далі - МА) та метод КС.

За більше ніж 50 років [126] МА метод добре зарекомендував себе на натурних ЗК для дослідження тільки напружень. МА працює на змінних полях, що дозволяє сканувати ЗК для пошуку найбільш небезпечних ділянок. Однак при досягненні напруженнями межі текучості відбувається спотворення (зменшення амплітуди) сигналу (на кшталт рис. 1.10). Це пояснюється появою дислокацій та напружень 2-го та 3-го родів, що їх врівноважують. Тому при знятті зовнішнього навантаження (напружень 1-го роду) ми отримуємо сигнал від напружень 2-го та 3-

го родів, котрі протилежні первинному навантаженню. Якщо навантажували розтягом, то залишковими будуть напруження стиснення. У 80 роках 20 століття Шель М.М [129, 130] проводив дослідження напруженого стану методом вищих гармонік сигналу магнітопружного перетворювача. Досліджень пластичних деформацій цим методом не проводилось. Складність апаратного рішення на той час не дозволила розповсюдженню методу. На теперішній час прогрес в електронно-обчислювальній техніці дозволяє використати метод вищих гармонік для дослідження пластичної зони ЗК.

Наявність суперечливих даних по методу КС (п. 1.4.2.) вказує на те, що метод потребує експериментальної перевірки для кожного виду завдань визначення напружено-деформованого стану. Крім того, метод КС працює в постійних полях (намагнічення до насичення ділянки та розмагнічення). Це призводить до значного часу визначення КС в одній точці (близько 7 секунд) та робить його неможливим для сканування ЗК. Нами було вирішено модернізувати метод КС для завдань сканування ЗК разом із методом МА шляхом використання змінних полів. Використання полів насичення є дуже енергоємним для використання на натурних об'єктах та призводить до примагнічення перетворювача із складністю його переміщення. Тому було прийнято рішення зменшити поле намагнічення із насичення до середніх. Коерцитивна сила є одним із параметрів петлі магнітного гістерезису. Перехід на змінні поля менші від насичення дозволяє використовувати і інші параметри петлі магнітного гістерезису. Ми назвали цей метод – методом параметрів перемагнічування (далі - ПП).

Отже запропоновано проводити експериментальні дослідження на зразках сталі 09Г2С із наведенням в останніх одновісних пластичних деформацій із подальшим додаванням одновісних напружень та одночасним використанням методів МА та ПП.

2.3 Розробка експериментальної установки для визначення напружено-деформованого стану зварних конструкцій магнітоанізотропним методом.

2.3.1 Експериментальна установка

Для дослідження впливу напружено-деформованого стану зварювальної конструкції на параметри магнітоанізотропного методу була розроблена та зібрана експериментальна установка.

Установка складається (рис 2.1) з генератора (ГЗ-112), експериментального перетворювача, АЦП, комп'ютера.

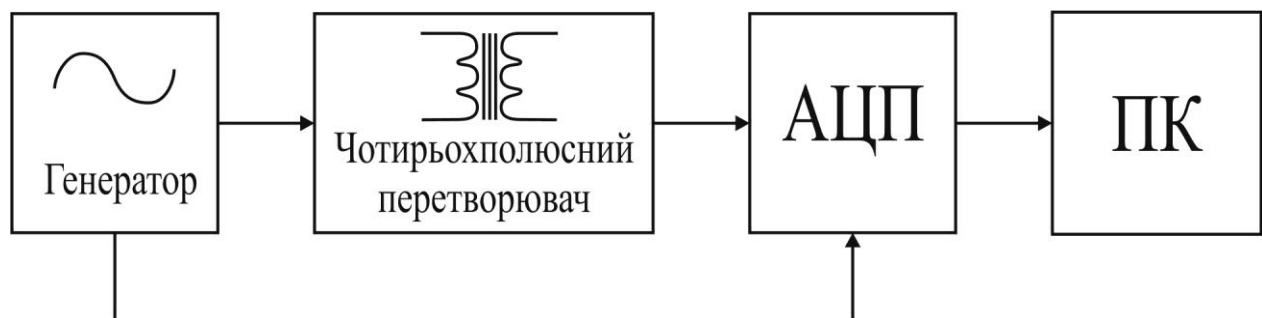


Рис 2.1 Функціональна схема установки по методу МА

Складові установки: генератор низької частоти (ГЗ-112) (синусоїдальний – режим) використовували частоту намагнічування 307Гц; перетворювач МА – призначений для локального намагнічення ділянки зварної конструкції і отримання сигналу на обмотці вимірювання; АЦП – призначений для перетворення аналогового сигналу в цифровий сигнал для подальшої обробки; комп'ютер – призначений для обробки цифрового сигналу обробки та збереження даних (рис 2.2).

Із генератора ГЗ-112 подавали синусоїдальний сигнал частотою 307 Гц та діючою напругою 7,88 вольт.

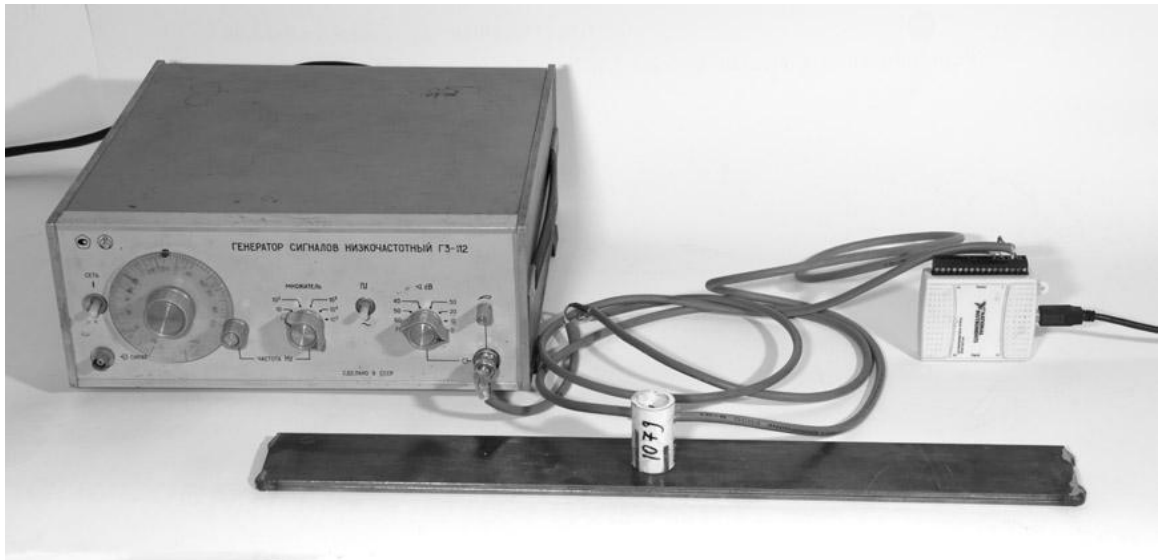


Рис. 2.2 Експериментальна установка для дослідження сигналів МА перетворювача (без комп'ютера).

2.3.2 Перетворювач

Експериментальний перетворювач - накладний електромагнітний перетворювач трансформаторного типу, первинна обмотка якого є обмоткою намагнічування (рис. 2.3), а вторинна - вимірювальною обмоткою. Обидві обмотки знаходяться на П-образних осердях, що розташовуються під кутом 90° один до одного.

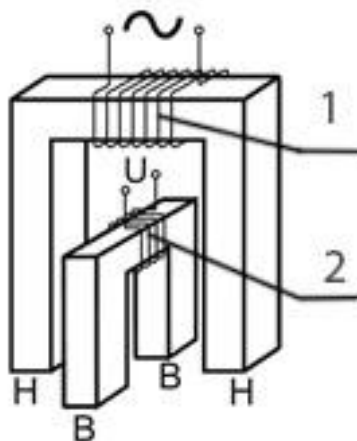


Рис 2.3 Перетворювач МА. 1- намагнічуюче осердя, 2 – вимірювальне осердя

Осердя виконано із шихтованого листового пермалою. Ширина осердь 26 мм. Намагнічуюча обмотка має 1000 витків дроту ПЕВ-2 діаметром 0,1 мм, вимірювальна обмотка має 4000 витків дроту ПЕВ-2 діаметром 0,04 мм (рис. 2.4)



Рис. 2.4 МА перетворювач

2.3.3 Аналого-цифровий перетворювач

АЦП - NI USB-6009 (США) - швидкодіючий 4-канальний модуль (рис.2.5). Високошвидкісний безперервний збір даних на частотах до 100 кГц. Архітектури з одним АЦП, комутатором і входними буферними підсилювачами в послідовно-опитуваних каналах повністю виключає комутаційну перешкоду, активні ФНЧ 3-го порядку в кожному каналі покращують співвідношення сигнал/шум.



Рис 2.5 Аналого-цифровий перетворювач

2.3.4 Програмне забезпечення

Перед програмним забезпеченням стояло завдання вимірювання сигналів вихідного (генератора) та із вимірювальної обмотки МА перетворювача. Крім того треба було визначити зсув фази цих сигналів та розкласти сигнал із вимірювальної обмотки МА на гармонійні складові.

Для виконання цих завдань застосовували програмне забезпечення «PowerGraph» ТОВ «ДИСофт» (Росія). Програмне забезпечення «PowerGraph» призначене для реєстрації, візуалізації, обробки і зберігання аналогових сигналів, які записані за допомогою різних пристроїв збору даних, і дозволяє використовувати персональний комп'ютер у якості стандартних вимірювальних і реєструючих приладів (вольтметрів, самописців, осцилографів, спектроаналізаторів, тощо).

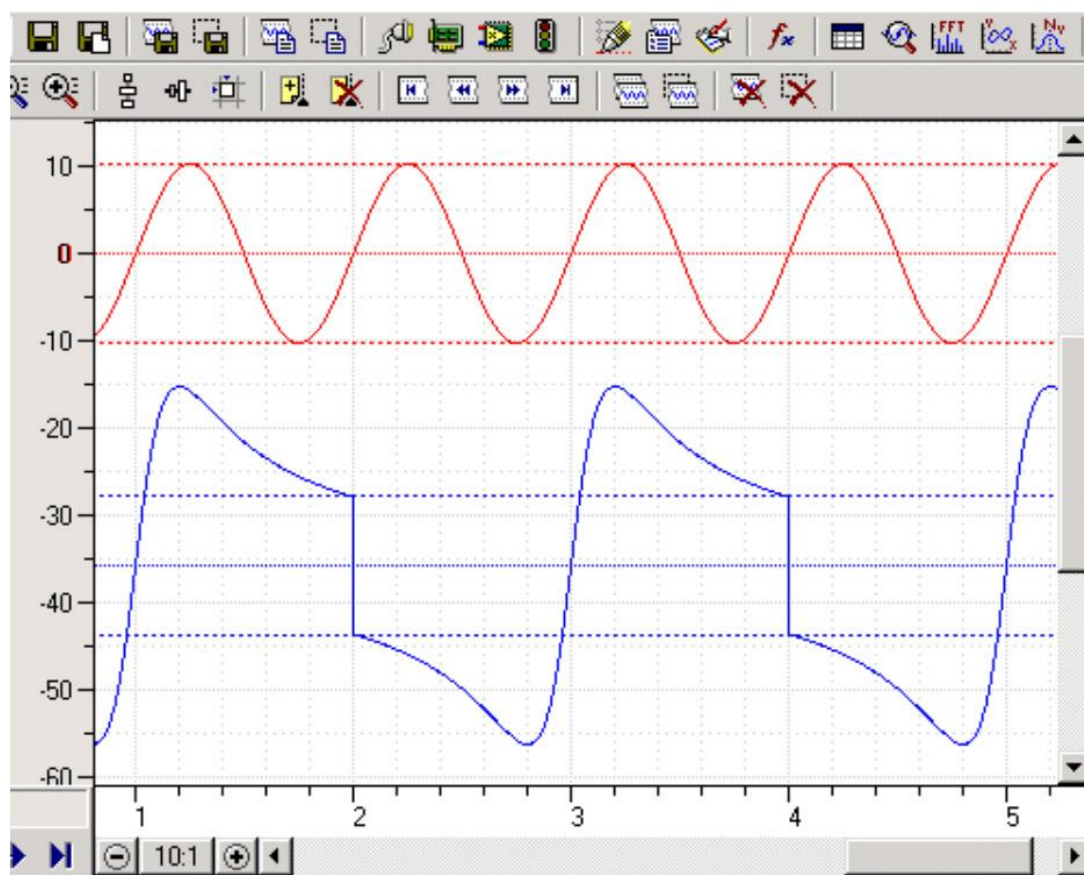


Рис. 2.6 Вікно програми PowerGraph.

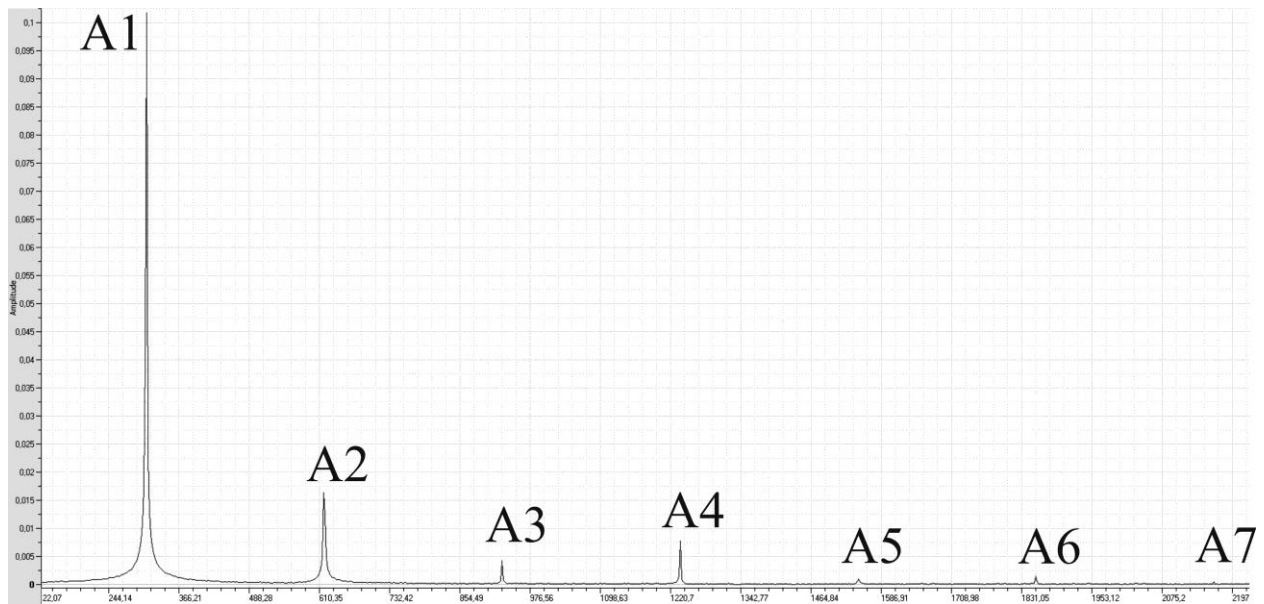


Рис. 2.7 Вікно програми PowerGraph із проведеним гармонійним аналізом. A1- перша гармоніка, A2- друга, A3- третя, A4- четверта, A5- п'ята, A6- шоста, A7 сьома гармоніка.

Для дослідження зміни фази сигналу із МА перетворювача проводили фільтрування сигналу із частотою пропускання 300-315 Гц. Після чого отримані криві (з генератора та відфільтровану із перетворювача) накладали одну на одну. Відстань між перетинами графіків осі часу давала нам сигнал пропорційний фазі (рис. 2.8).

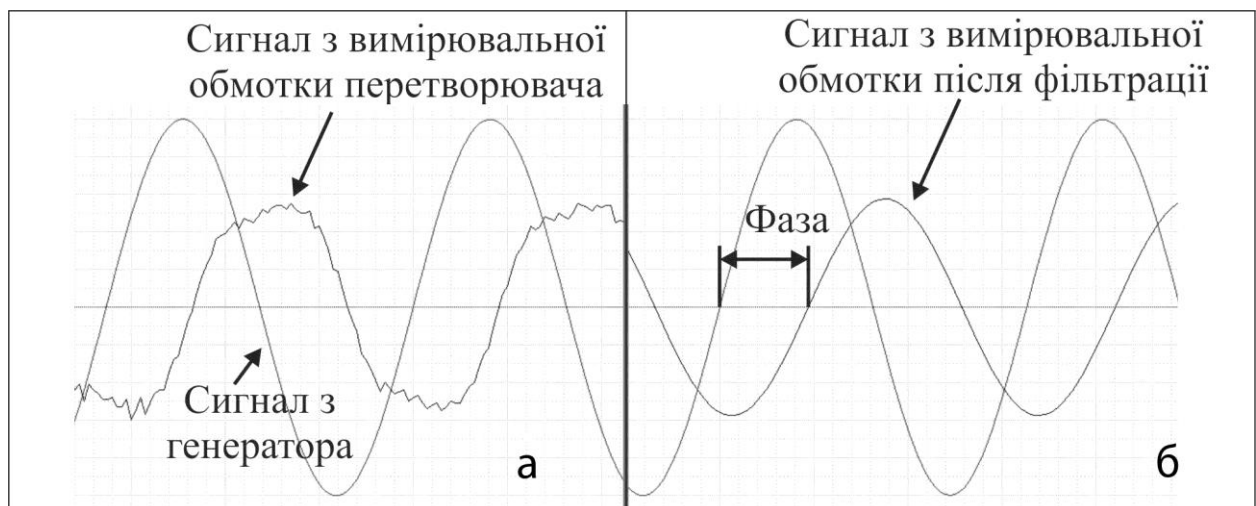


Рис.2.8 Вимірювання фази сигналу МА перетворювача.

а – до фільтрації, б – після фільтрації.

2.4 Розробка експериментальної установки для визначення напружено-деформованого стану зварних конструкцій методом параметрів переманічування

2.4.1 Експериментальна установка

Для дослідження впливу напружено-деформованого стану зварних конструкцій на параметри методу ПП була розроблена та зібрана експериментальна установка. Установка складається (рис. 2.9) з генератора (ГЗ-112), підсилювача намагнічуючого сигналу, шунта, експериментального перетворювача, АЦП, комп'ютера.

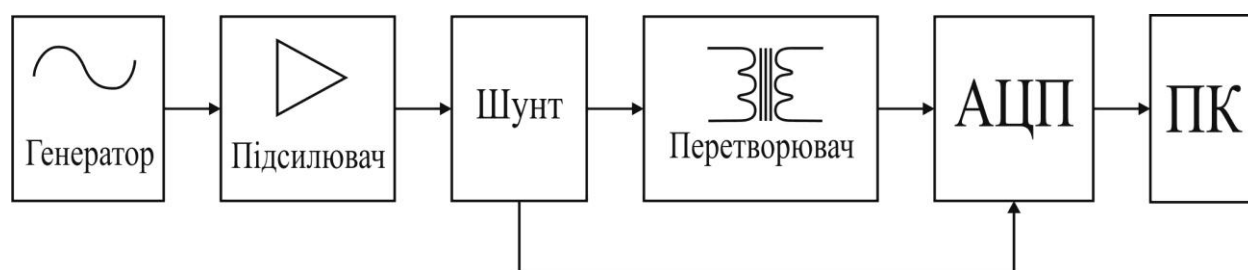


Рис 2.9 Функціональна схема установки по методу ПП

У якості генератора низької частоти використовували генератор ГЗ-112 (синусоїдальний – режим) на частотах намагнічування 40-50Гц.

Підсилювач був зібраний на стандартних блоках АІ7293 для підсилення намагнічуючого сигналу, що подається на намагнічуючу обмотку перетворювача.

Шунт – набір резисторів $P=5$ Вт, $R=600$ Ом, призначений в якості перетворення струму та отримання напруги для АЦП.

Перетворювач – призначений для локального намагнічення ділянки зварної конструкції і отримання шумового сигналу на обмотці вимірювання.

АЦП (аналого-цифровий перетворювач) – призначений для перетворення аналогового сигналу в цифровий сигнал для подальшої обробки.

Комп'ютер – призначений для обробки цифрового сигналу та збереження.
Загальний вигляд установки зображений на рис 2.10.

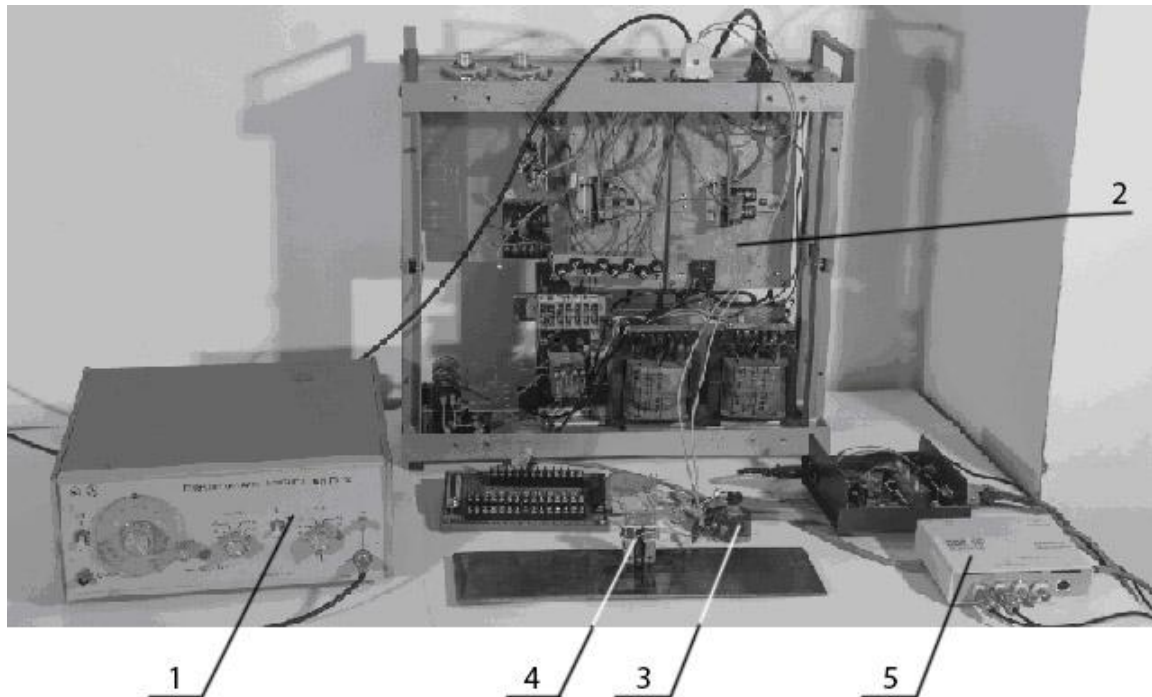


Рис 2.10 Експериментальна установка для дослідження методом ПП (комп'ютер не показано). 1- генератор, 2 – підсилювач, 3 – шунт, 4 – перетворювач, 5 – АЦП

2.4.2 Генератор сигналів

Генератор сигналів обрали низькочастотний стандартний - ГЗ-112.

2.4.3 Підсилювач намагнічуючого сигналу

Блок підсилювача потужності звукової частоти АІ7293 виконаний на мікросхемах ТДА7293. Основні характеристики: напруга живлення – від 12-50 В, діапазон частот – 20Гц-20кГц, потужність 140 Вт.

2.4.4 Перетворювач

Виготовлено два перетворювачі: широкий із шириною набору пластин 17 мм та вузький із шириною набору пластин 5 мм. Широкий застосовувався на зразках, а вузький - для досліджень на зварних швах. Довжина контактної частини перетворювача 30 мм.

Перетворювач являє собою П-подібний електромагніт із намагнічуючою та вимірювальною обмотками (рис.2.11, 2.12)

Перетворювач складається з осердя, котушки намагнічування, котушки вимірювання.

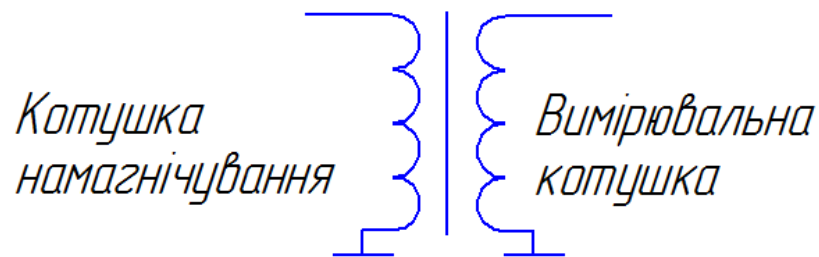


Рис 2.11. Структурна схема перетворювача по методу ПП

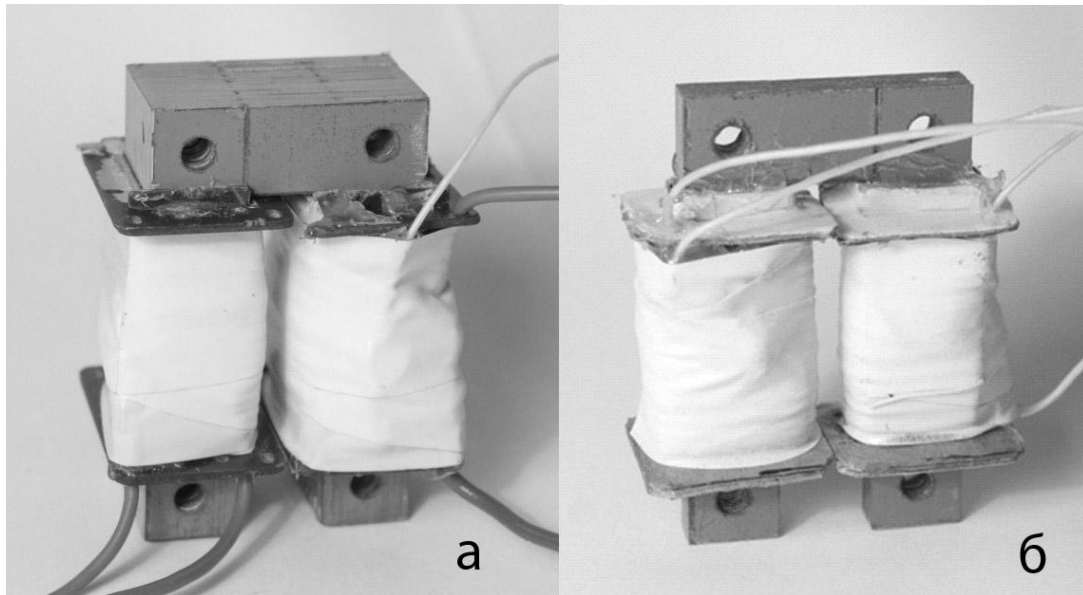


Рис. 2.12 Перетворювач по методу ПП.

а – із широким осердям, б – із вузьким осердям

Осердя виготовлено із пластин Г-і П-подібної форми електромагнітної сталі СТ товщиною - 0,33 мм для зменшення струмів Фуко і склеєні між собою електротехнічним клеєм БФ-4.

Котушки намагнічування намотані дротом з міді – ПЕВ-2 на каркасі з елетротехніческого картону ЭВ ГОСТ 2824-86 – Г.

Вимірювальна котушка широкого перетворювача має 800 витків з мідного дроту ПЕВ-2 на каркасі з електротехнічного картону ЭВ ГОСТ 2824-86 – Г. Обмотка намагнічування широкого перетворювача має 2000 витків, вузького -2500 того ж самого дроту.

На перетворювачі подавали струм 20,7 мА (поле намагнічування 300 А/м) частотою 50 Гц.

2.4.5 Аналого-цифровий перетворювач

Е20-10 - швидкодіючий 4-канальний модуль АЦП (Росія). Високошвидкісний безперервний збір даних на частотах до 10 МГц (рис. 2.13). Архітектури з одним АЦП, комутатором і вхідними буферними підсилювачами в послідовно опитуваних каналах повністю виключає комутаційну перешкоду, активні ФНЧ 3-го порядку в кожному каналі покращують співвідношення сигнал / шум.



Рис. 2.13 Аналого-цифровий перетворювач E20-10

2.4.6. Програмне забезпечення методу ПП

Оригінальне програмне забезпечення для визначення параметрів петлі магнітного гістерезису написано автором на мові LabVIEW. Воно дозволяє визначити половину максимальної ширини петлі гістерезису по осі напруженості магнітного поля (H_{\max}), половину максимальної висоти петлі магнітного гістерезису по осі індукції (B_{\max}), половину перетину петлі гістерезису по осі напруженості поля (H), половину перетину петлі гістерезису по осі індукції (B) та площу (S) петлі магнітного гістерезису. Цікавим параметром є кут нахилу петлі гістерезису (α), та на жаль використати його не вдалось через складність визначення крайньої точки петлі гістерезису. Для зменшення завад при визначенні параметрів перемагнічування проводили усереднення по 50 циклам.

Вигляд вікна програмного забезпечення, розробленого автором у даній роботі для визначення параметрів перемагнічування, наведено на рис. 2.14.

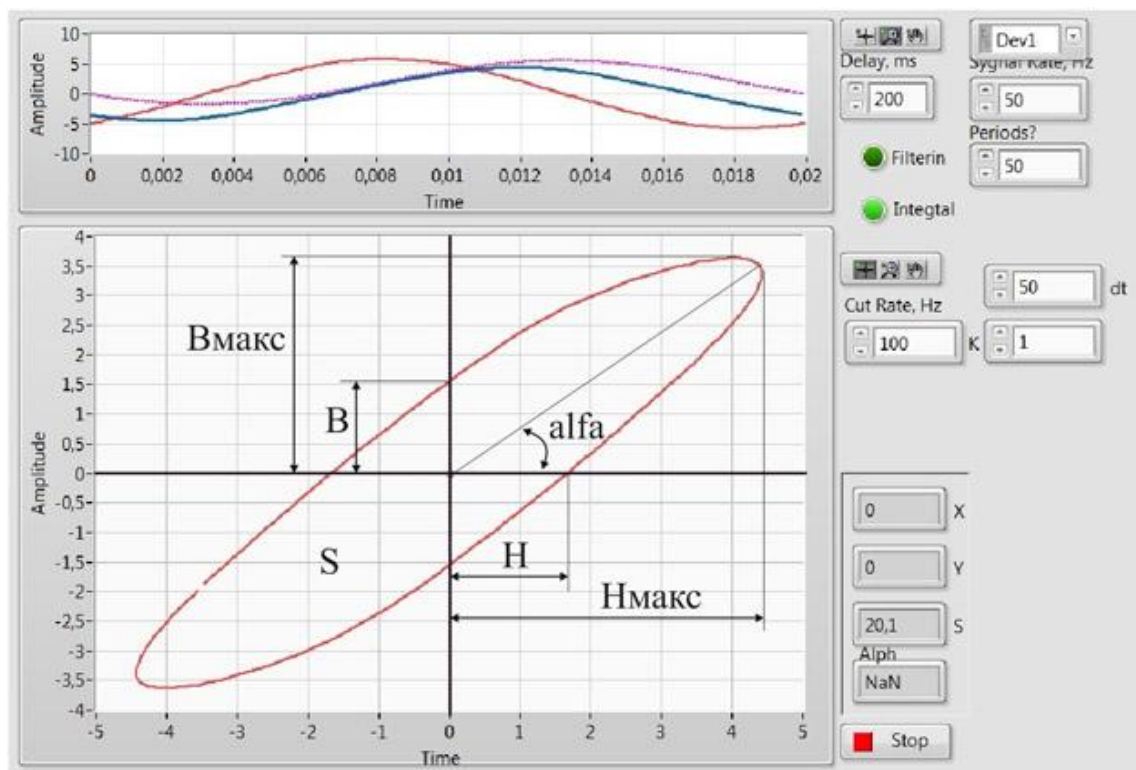


Рис.2.14 Загальний вигляд вікна програми, розробленої автором для визначення параметрів перемагнічування

Створювати пластичні деформації стиснення на плоских зразках досить складно в наслідок можливості втрати стійкості зразка. Нами було прийнято рішення створювати деформації стиснення під час нагрівання робочої зони зразка. Нагрів робочої зони зразка проводили пропаново-кисневою сумішшю за допомогою газового різачка. Нагрівання пластини проводили з однієї сторони до температури вище 600°C (реально $750-850^{\circ}\text{C}$) із витримкою 1 хв. для більш рівномірного розподілу тепла між сторонами пластини. Контроль температури нагріву здійснювали за допомогою цифрового пірометра Raytec PM Plus.

2.4.7 Оптимізація поля намагнічування методу ПП

З метою оптимізації поля намагнічування були проведені експериментальні дослідження зміни параметрів петлі магнітного гістерезису від напруженості поля. Напруженість поля намагнічування змінювали від 100 А/м до 400 А/м із кроком 100 А/м. Перетворювач методу ПП встановлювався на балку зразок сталі 09Г2С товщиною 8 мм, довжиною 450 мм та шириною 60 мм. Балка-зразок навантажувалась в установці чистого вигину (чотирьох точковим згином)

Схема та епюри згинаючих моментів M та поперечної сили Q наведено на рис. 2.15.

Така конструкція установки для навантаження не потребує точного позиціювання перетворювача на зразку. Епюра напружень у зразку не змінюється по довжині і в середині зразка (крім того поперечна сила дорівнює тут нулю). Тому хоч маленьке зміщення перетворювача при його зніманні та встановленні не призводить до втрати повторності рис 2.16.

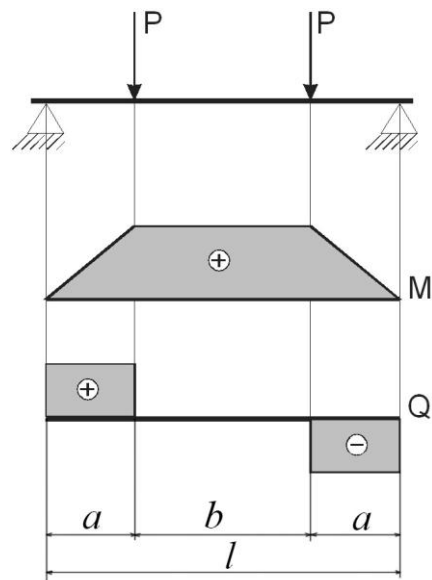


Рис. 2.15 Схема установки та епюри згинаючих моментів M та поперечної сили Q установки для чистого вигину.

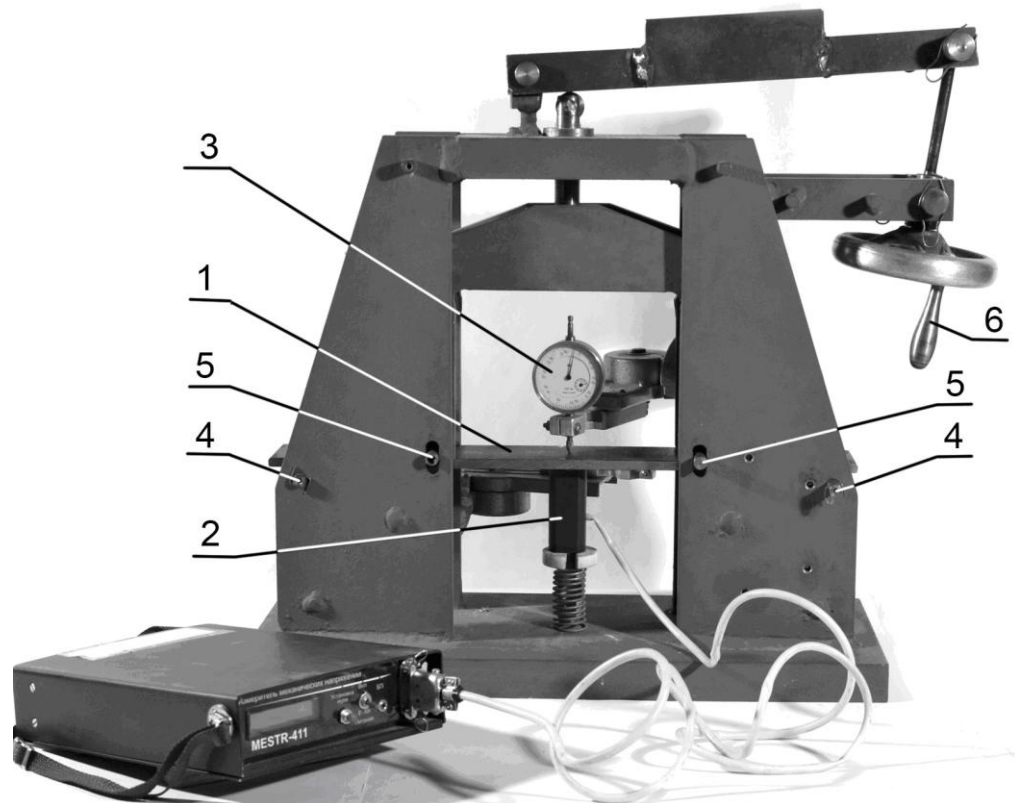


Рис. 2.16 Експериментальна установка для навантаження плоских зразків чистим вигином. 1 – зразок-балка, 2 – перетворювач, 3 – індикатор прогину, 4 – нерухомі опори зразка-балки, 5 – рухомі опори зразка-балки, 6 – ручка механізму навантаження.

Контроль навантаження здійснюється за допомогою виміру прогину зразка-балки. Прикладені сили можна змінювати вручну шляхом гвинтового опускання важеля (рис. 2.16, важіль зверху, гвинт важеля праворуч). Визначення прогину в середині зразка здійснювали за допомогою індикатора «годинникового типу» із ціною поділки 0,01 мм.

У подальшому розраховували напруження на поверхні зразка-балки із використанням відомої формулі згину балки [127]:

$$\sigma = \frac{f_{\max} 24EI a y_{\max}}{l^3 (4 \frac{a^3}{l^3} - 3 \frac{a}{l}) I} = \frac{f_{\max} 24E a y_{\max}}{l^3 (4 \frac{a^3}{l^3} - 3 \frac{a}{l})} \quad (2.1)$$

де: a - відстань між опорою та місцем прикладення сили до зразка-балки 100мм (рис.2.16);

l – відстань між опорами (400 мм);

E – модуль пружності сталі, $2 \cdot 10^5$ МПа;

y_{\max} – половина висоти плоского зразка-балки (4 мм);

f_{\max} – величина найбільшого прогину зразка-балки;

приймаючи до уваги формулу прогину зразка-балки [128]:

$$f_{\max} = \frac{Pl^3}{24EI} (4 \frac{a^3}{l^3} - 3 \frac{a}{l}), \quad (2.2)$$

$$\text{де: } l = 2a + b = 400 \text{ мм}, \quad (2.3)$$

b - відстань між прикладеними силами 200 мм (рис.2.16)

Розрахунки показали, що при $f_{\max}=5,18$ мм напруження на поверхні зразка-балки складає 226 МПа.

Також проводили розрахунки найбільшого напруження на поверхні зразка при досягненні найбільшого прогину шляхом навантаження зразка-балки відомою силою (за допомогою динамометру). Напруження розраховували по відомій формулі [128] для згину балки

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (2.4)$$

де M – згинаючий момент (для ділянки виміру $M = Pa$),

W – момент опору зразка-балки [128]

$$W = \frac{I}{y_{\max}}, \quad (2.5)$$

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (2.6)$$

де I – момент інерції,

b – ширина зразка-балки (60 мм),

h – товщина зразка-балки (8 мм).

При досягненні $f_{\max}=5,18$ мм загальне навантаження (2Р) склало 2870 Н, що відповідає напруженню 224 МПа. Ці напруження і були в подальшому використані для градуювання установки для навантаження зразків-балок.

Навантаження проводили ступінчато із кроком 32 МПа (таблиця 2.3)

Таблиця 2.3 Навантаження плоских зразків-балок 8 мм

№	Максимальний прогин, мм	Напруження, МПа
1	0	0
2	0,74	32
3	1,48	64
4	2,22	96
5	2,94	128
6	3,70	160
7	4,44	192
8	5,18	224

Отримані залежності параметрів петлі магнітного гістерезису наведено на рис. 2.17...2.20. Видно, що всі параметри петлі магнітного гістерезису майже монотонно змінюються. Нами обрано намагніченість у 300А/м. Це пояснюється доброю зміною та достатньою величиною параметрів, що можна стабільно вимірювати. Використання напруженості 400 А/м можливо, але це призведе до збільшення споживання автономної апаратури при вимірюваннях на натурних ЗК.

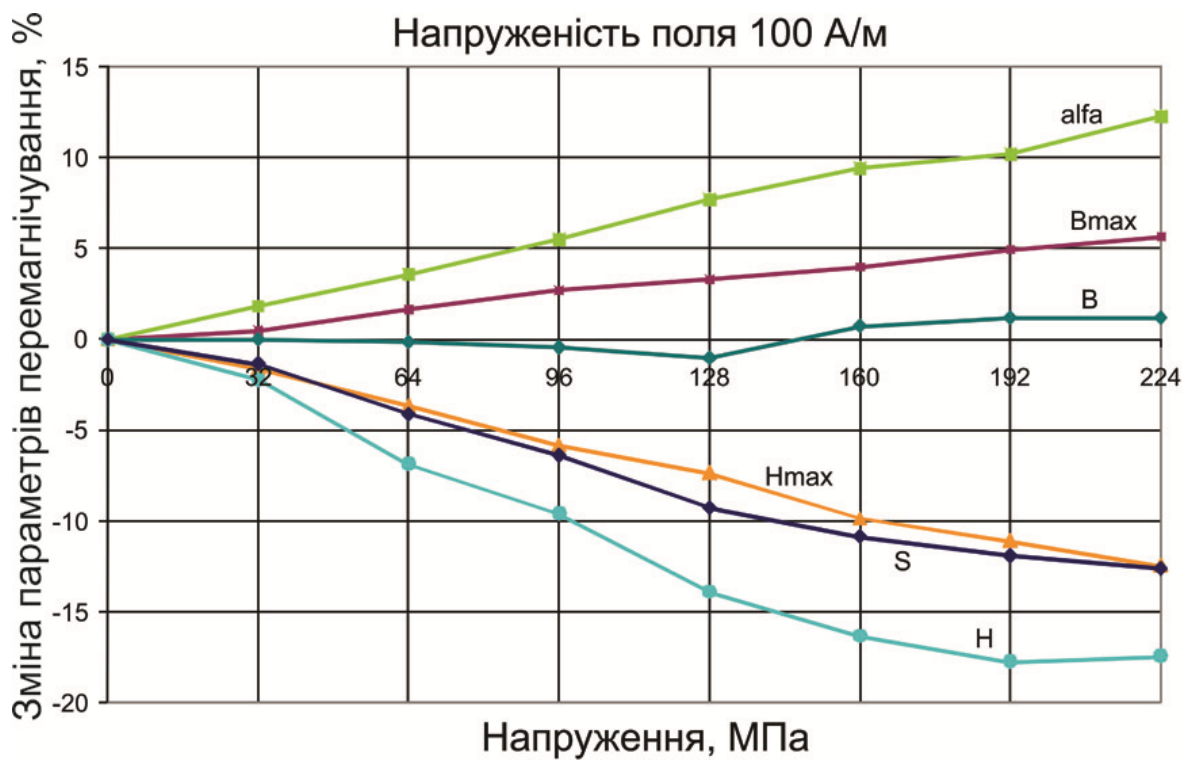


Рис. 2.17 Залежність зміни (у %) параметрів методу ПП від напружень розтягу при напруженості магнітного поля 100А/м

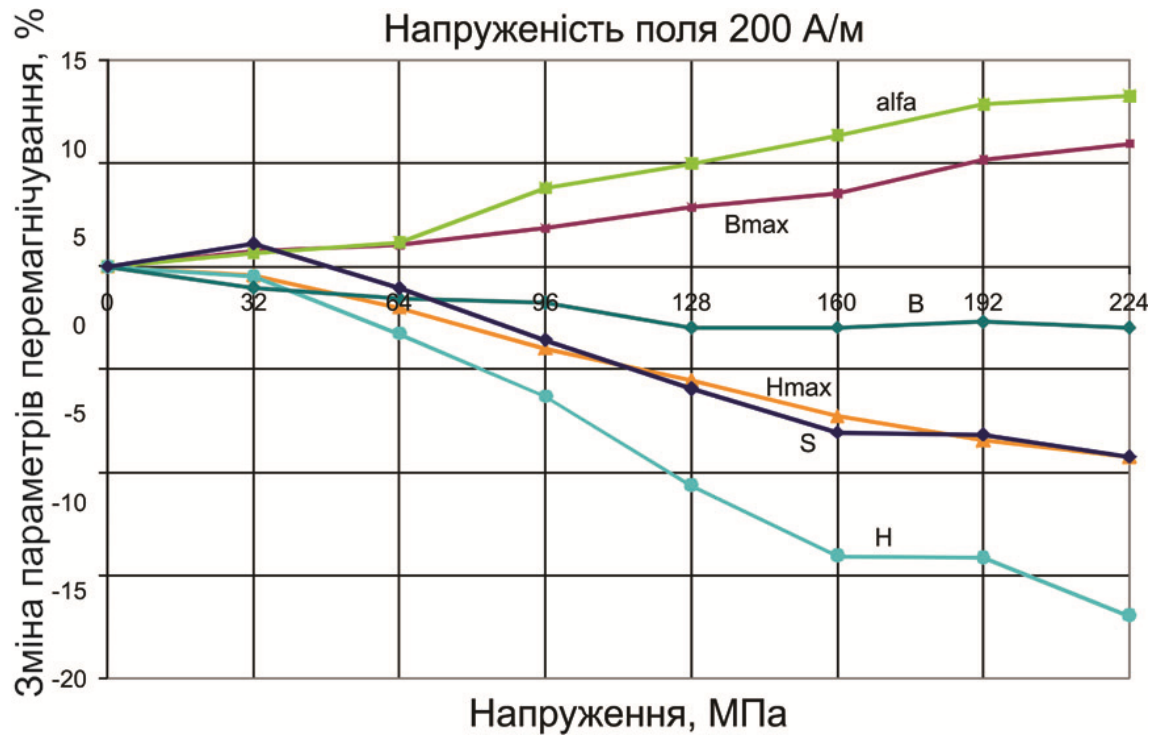


Рис. 2.18 Залежність зміни (у %) параметрів методу ПП від напружень розтягу при напруженості магнітного поля 200А/м

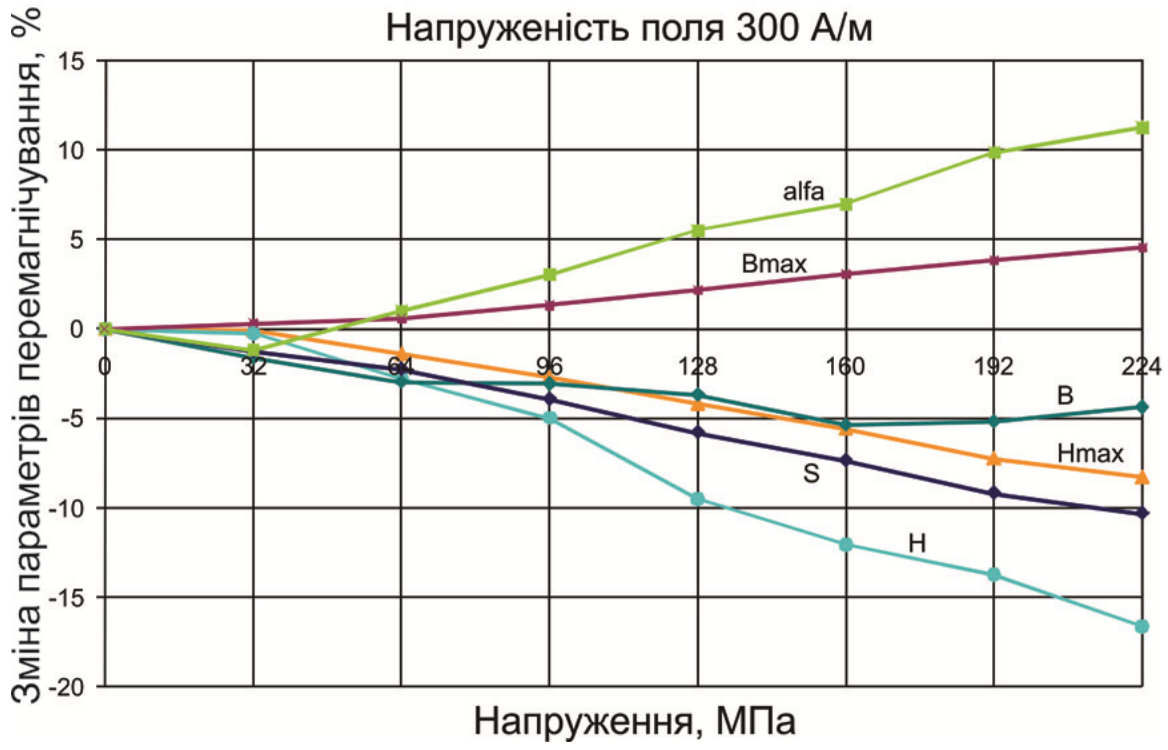


Рис. 2.19 Залежність зміни (у %) параметрів методу ПП від напружень розтягу при напруженості магнітного поля 300А/м

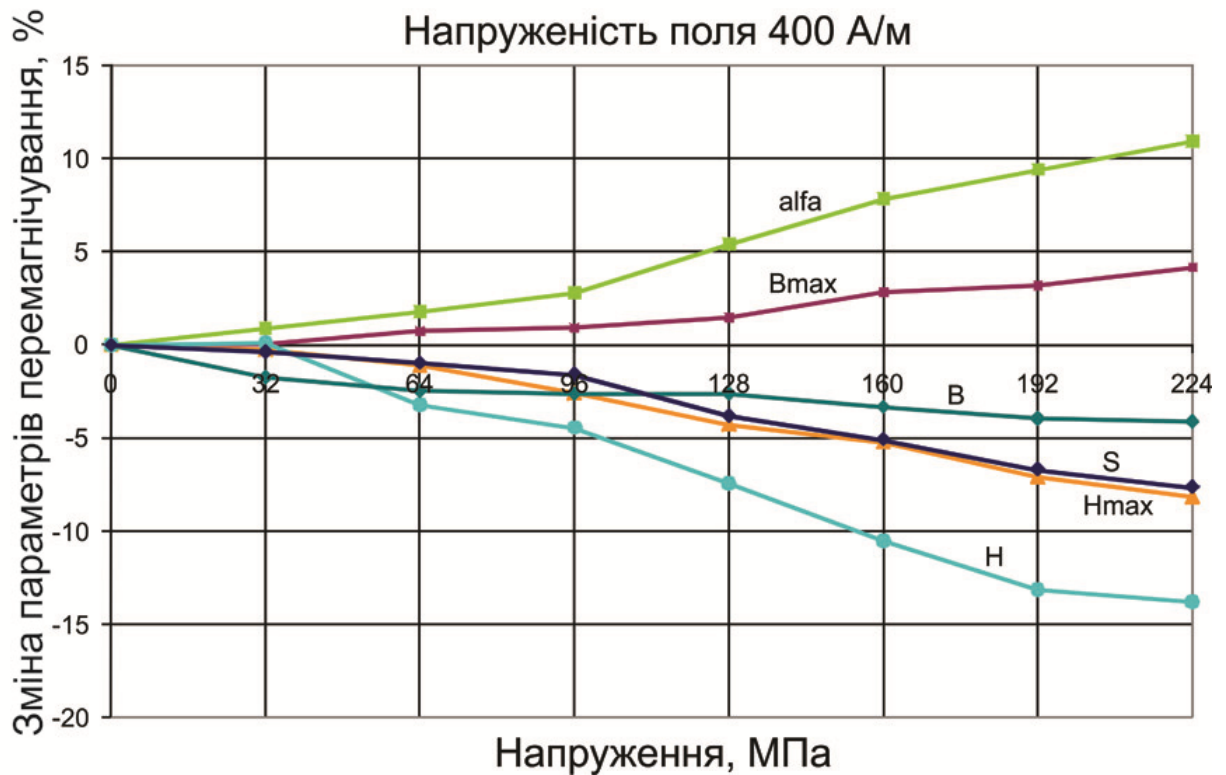


Рис. 2.20 Залежність зміни (у %) параметрів методу ПП від напружень розтягу при напруженості магнітного поля 400А/м

2.5 Наведення пластичних деформацій у плоских зразках

2.5.1 Методика та установка для наведення пластичних деформацій стиснення у плоских зразках

Зразки із сталі 09Г2С товщиною 4 мм мали розміри 450х60 мм. Робоча зона розташовувалась по середині зразка.

Для деформування зразка-балки було виготовлено спеціальне пристосування (рис.2.21, 2.22)

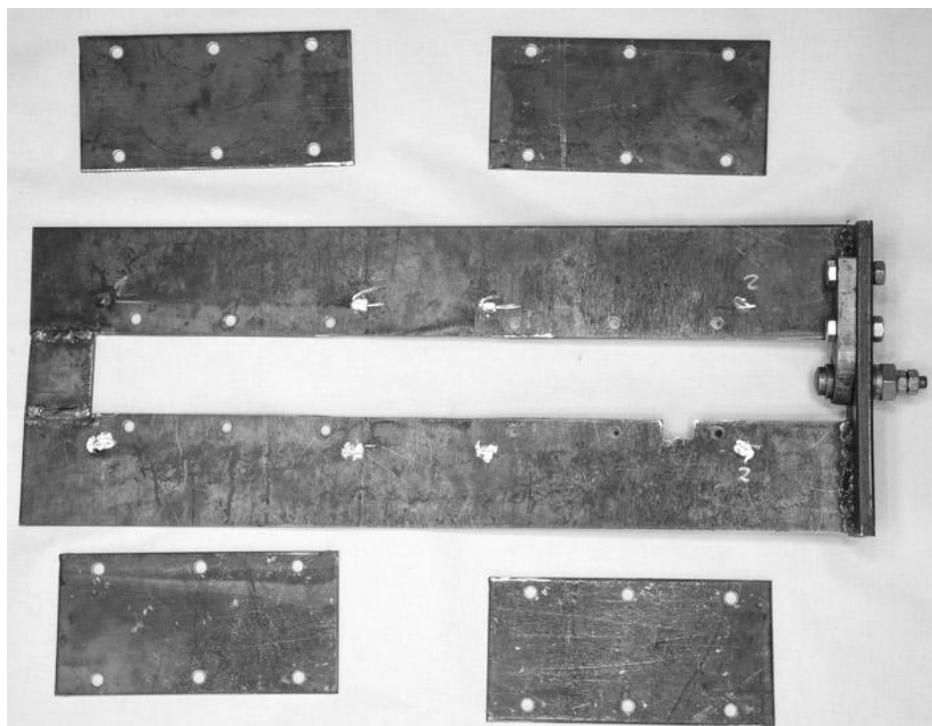


Рис. 2.21 – Пристосування для пластичного деформування плоского зразка стисненням (без зразка-балки)

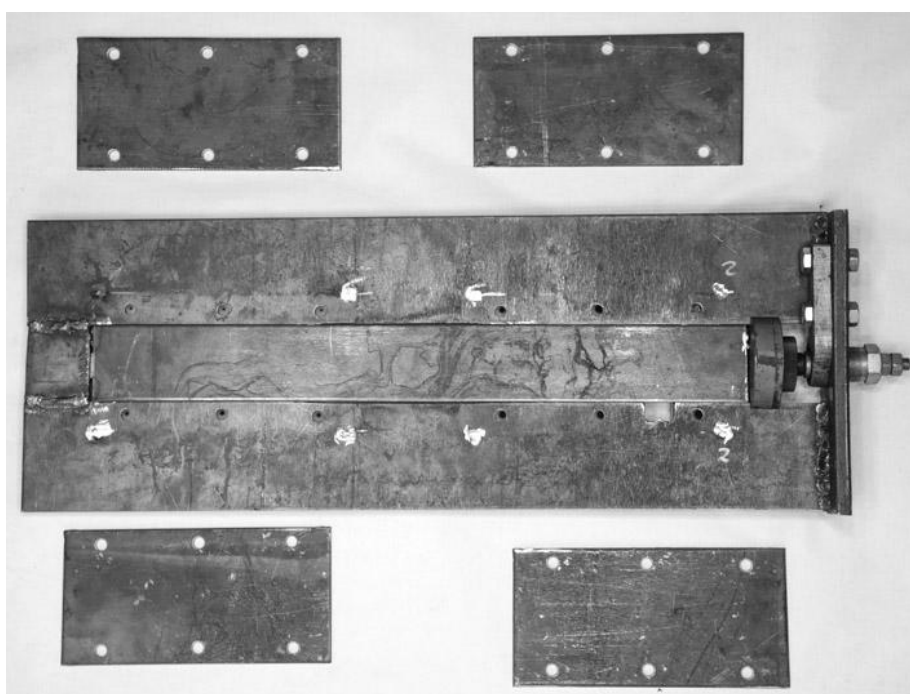


Рис. 2.22 – Пристосування для пластичного деформування плоского зразка-балки стисненням (із зразком)

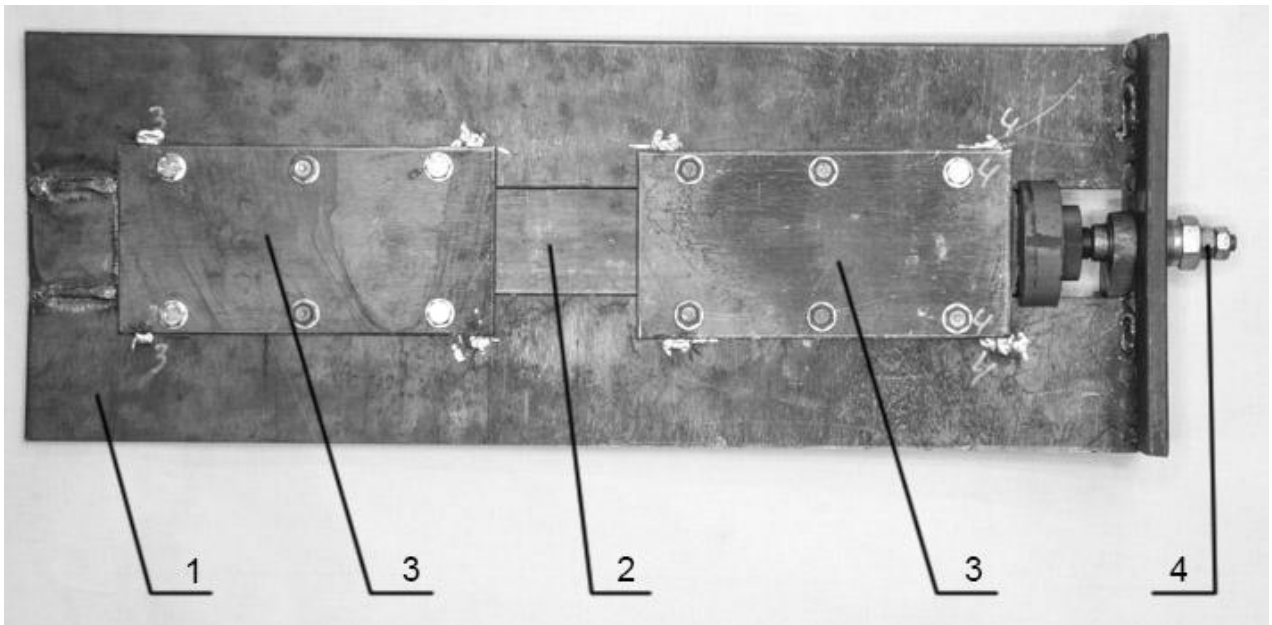


Рис. 2.23 – Пристосування для пластичного деформування плоского зразка-балки стисненням в зібраному стані. 1 – корпус пристосування, 2 – зразок-балка, 3 – направляючі накладки (4 шт.), 5 – гвинт для деформування

Зразок 2 (рис. 2.23) вкладався в середину корпусу 1 пристосування. Для зменшення втрати стійкості зразка використовувались направляючі накладки 3 (по дві із кожної сторони). Після нагрівання зразка за допомогою гвинта 4 проводили деформування.

Контроль ступеню пластичного деформування проводили за допомогою механічного деформометра із застосуванням головки годинникового типу (рис. 2.24, 2.25) . База вимірювань деформацій складала 50 мм.

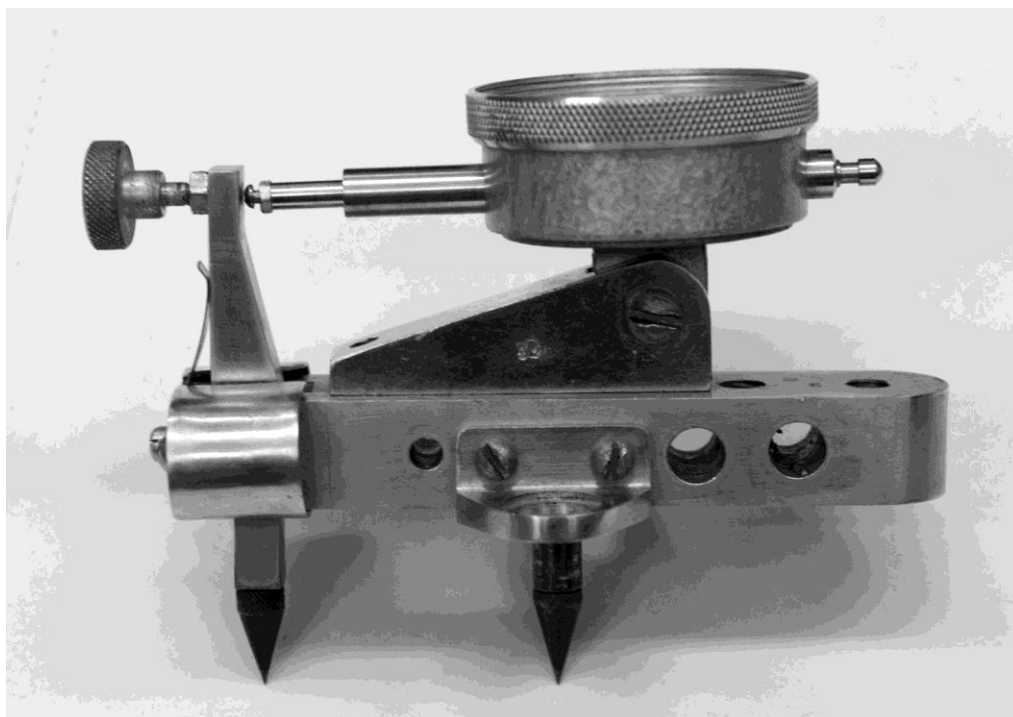


Рис. 2.24 Фронтальний вигляд деформометра із застосуванням головки годинникового типу

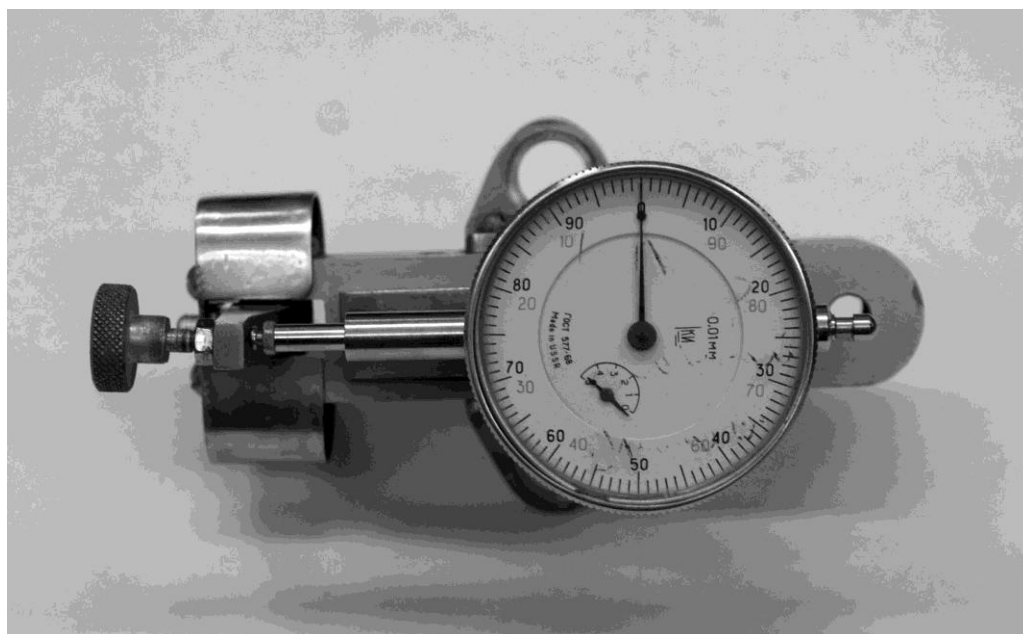


Рис. 2.25 Вигляд зверху деформометра із застосуванням головки годинникового типу

2.5.2 Методика та установка для наведення пластичних деформацій розтягу у плоских зразках

За звичай стандартні розривні машини побудовані на використанні гідроциліндру, у який під тиском подається олива. Тиск створює потужна гідростанція. Крім того, шкала вимірювання таких машин являє собою силовимірювач. Це призводить до того, що при спробі навести у зразках попередньовизначену величину пластичного деформування, при виході на площадку текучості не можливо контролювати деформування в наслідок великої інертності гідравлічної системи.

З метою усунення цього недоліку була розроблена та виготовлена машина для пластичного деформування плоских зразків (рис. 2.27). Вона побудована по класичній схемі розривної машини із використанням у якості пристрою навантаження ручного домкрату із найбільшим зусиллям 250 кН. Машина складається із нерухомої частини 1 та рухомої 2. Між нерухомою і рухомою частинами закріплено зразок 3 для деформування. Зразок 3 закріплено у захватах 4 нерухомої частини 1 та 5 рухомої частини 2. Ручний домкрат 6 встановлено на верх нерухомої частини 1.

Контроль ступеню пластичного деформування проводили за допомогою двох приладів: механічного деформометра із застосуванням головки годинникового типу та модернізованого цифрового штангенциркуля (рис. 2.28).

Деформометр із застосуванням головки годинникового типу використовували безпосередньо на установці при проведенні деформування, а модернізований штангенциркуль - при контролі деформацій. При деформуванні зразка необхідну величину деформацій визначали як додаток необхідних пластичних деформацій та величини пружних деформацій. Проведення вимірів деформацій деформометром та штангенциркулем показано на рис. 2.29 та 2.30.

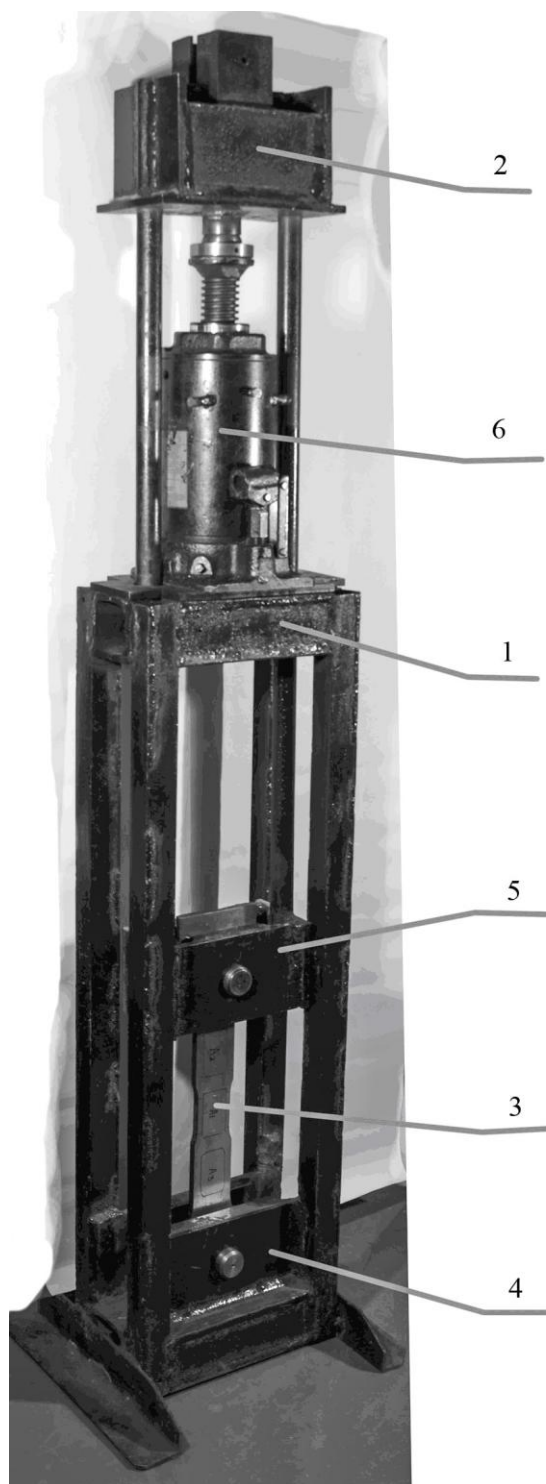


Рис. 2.27 Загальний вигляд машини для пластичного деформування. 1- корпус, 2 - рухома частина, 3 – зразок, 4 – нерухомий захват, 5 – рухомий захват, 6 – ручний гідравлічний домкрат

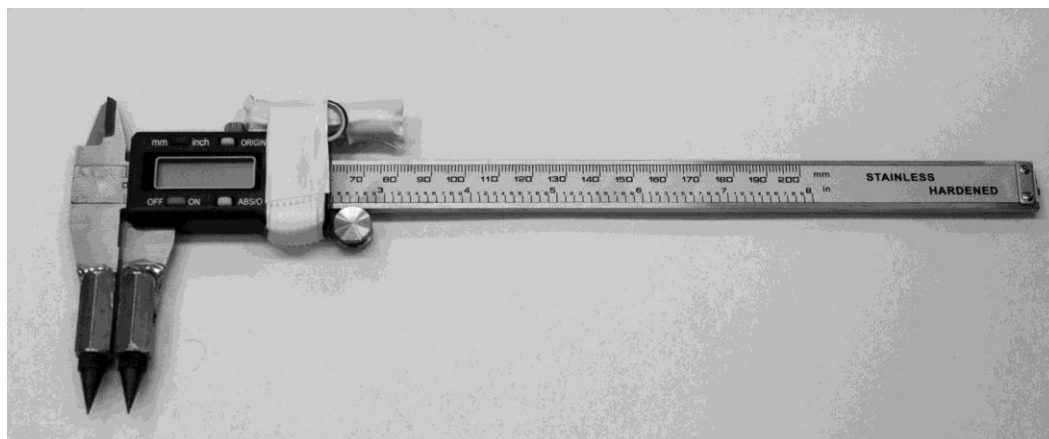


Рис. 2.28 Вигляд модернізованого штангенциркуля

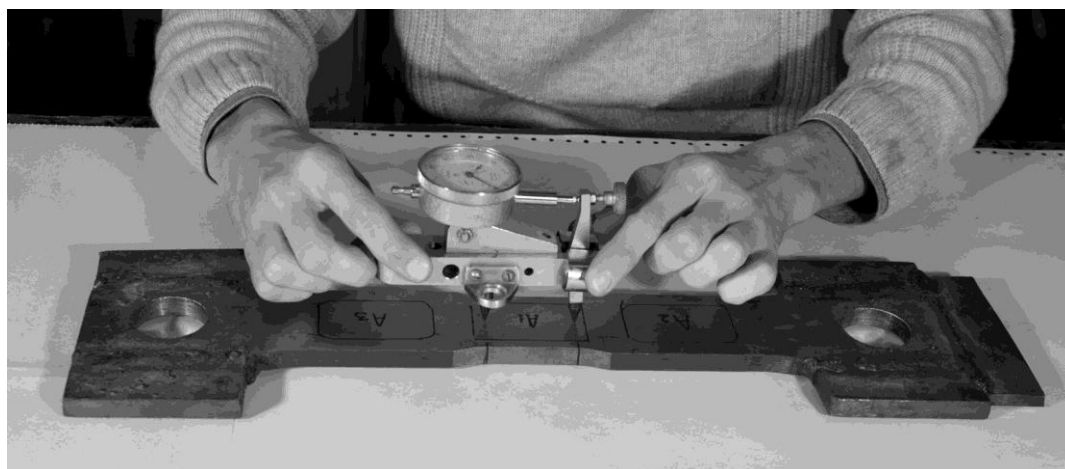


Рис. 2.29 Визначення пластичних деформацій за допомогою деформометра

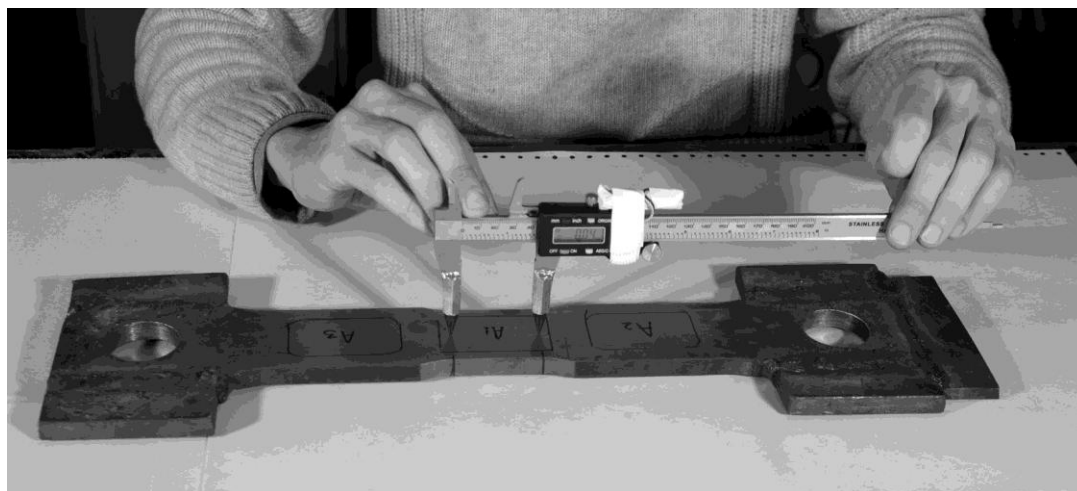


Рис.2.30 Визначення пластичних деформацій за допомогою модернізованого штангенциркуля

Перед проведенням деформації зразків створювати (свердлили) базові отвори на відстані 50мм. Отвори були діаметром 1мм на глибину 4 мм. Після цього зенкували отвори свердлом 2,5 мм, а потім притирали отвори шліфованим твердосплавним конусом із кутом 30°.

Співставлення показів деформометра при навантаження на установці та модернізованого штангенциркуля при розвантаженні наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Співставлення показів деформометра та модернізованого штангенциркуля

Розрахункова пластична деформація, %	Покази деформометра, мм	Покази модернізованого штангенциркуля, мм				
0	0	0,00	-0,01	0,00	0,01	0,00
1	0,56	0,64	0,57	0,56	0,56	0,55
2	1,01	1,01	1,01	0,99	1,00	1,01
3	1,51	1,50	1,52	1,50	1,50	1,51
4	2,01	1,98	1,97	2,03	2,02	1,99
5	2,46	2,46	2,46	2,45	2,47	2,54
6	2,98	2,95	2,97	2,98	3,00	2,97
7	3,44	3,47	3,44	3,42	3,46	3,44
8	3,93	3,94	3,93	3,94	3,90	3,91
9	4,46	4,39	4,39	4,47	4,45	4,43
10	4,95	4,97	4,98	4,93	4,94	4,98

Дані таблиці показують прийнятну точність визначення деформацій цифровим штангенциркулем.

2.5.3 Зразки для наведення пластичних деформацій розтягу

За звичай зразки для розтягування на розривних машина регламентуються стандартом ГОСТ 1497-84. Приймаючи до уваги, що пластична деформація завжди локалізована [128], ми виготовили зразки товщиною 12 мм (рис. 2.31) із листової сталі ВСт3пс. Ширина робочої частини зразка склала 60 мм. В центрі зразка виконано звуження (до 50мм) для локалізації пластичної деформації та просвердлено два отвори діаметром 1 мм із базою 50 мм для контролю рівня пластичного деформування.

Наведення пластичних деформацій контролювали коерцитиметром КИМ-2М. Для зменшення похибки від установки перетворювача коерцитиметра поверхню зразка було відшліфовано. Для запобігання нагартуванню зразка шліфування проводили вручну із застосуванням наждачного паперу. Кожна сторона зразка розбита на три зони. В центрі зразка основна зона вимірювань А1 (Б1 з іншої сторони) та контрольні зони А2 (Б2) та А3 (Б3).

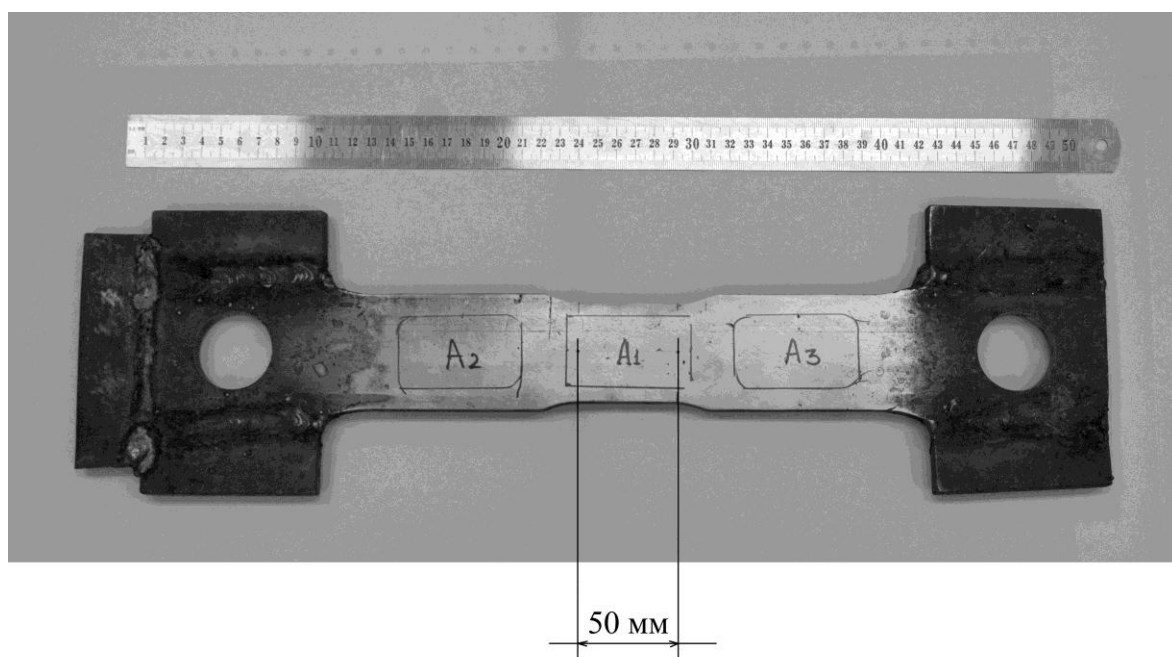


Рис. 2.31 Зразок для пластичного деформування

Контроль ступеню пластичного деформування проводили за допомогою двох приладів: механічного деформометра із застосуванням головки годинникового типу (рис.2.18, 2.19) та модернізованого цифрового штангенциркуля (рис. 2.21).

Процес вимірювання коерцитивної сили (КС) показано на рис. 2.32



Рис.2.32 Вимірювання коерцитивної сили

КС визначали шляхом п'яти вимірювань із кожної сторони зразка. З метою усунення ефекту тренування зразка перші два виміри відкидались. Отримані значення КС при пластичному деформуванні розтягом наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Значення коерцитивної сили при пластичному деформуванні розтягом зразка

Розрахункова пластична деформація, %		Коерситивна сила, А/м																	
		A2			A1			A3			B2			B1			B3		
0	300	300	300	300	300	300	300	311	311	311	300	300	300	277	277	277	311	311	311
1	288	288	288	380	380	380	380	300	311	311	265	265	277	403	403	403	311	311	311
2	311	311	311	440	440	440	440	323	323	323	311	311	311	494	494	508	323	323	346
3	426	440	440	403	403	403	403	454	454	454	494	494	494	508	508	508	467	467	467
4	481	481	481	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	562	562	562	535	535	535
5	494	508	508	548	548	548	548	548	548	548	548	548	562	589	589	589	562	575	562
6	508	508	521	562	562	562	562	548	548	548	548	548	548	575	589	589	562	575	575
7	535	535	548	562	562	562	562	562	562	562	589	589	589	616	616	616	589	589	589
8	548	548	548	589	589	589	589	630	630	643	589	589	589	643	643	643	575	575	575
9	535	535	535	562	575	575	575	562	575	575	548	548	562	630	630	630	589	589	589
10	548	562	548	616	616	616	616	589	575	589	589	589	589	643	643	643	616	616	616

По отриманим значенням КС розраховували середнє арифметичне. Розрахунки середнього арифметичного значення КС сили наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 - Розрахунки середнього арифметичного значення КС

Наведена деформація, %	Коерцитивна сила, А/м					
	А2	А1	А3	Б2	Б1	Б3
0	300	300	311	300	277	311
1	288	380	307	269	403	311
2	311	440	323	311	499	331
3	435	403	454	494	508	467
4	481	521	521	521	562	535
5	503	548	548	553	589	566
6	512	562	548	548	584	571
7	539	562	562	589	616	589
8	548	589	634	589	643	575
9	535	571	571	553	630	589

Графічну залежність КС від пластичних деформацій наведено на рис. 2.33. При збільшенні пластичних деформацій до 2% КС в зоні А1 (Б1) досить швидко зростає. В зонах А2(Б2) та А3(Б3) зростання не спостерігається. В зоні А2(Б2) спостерігається навіть зменшення КС. Перевищення пластичних деформацій рівня 2% до 3% призводить до нагартування зони А1 (Б1) із значним ростом КС в зонах А2(Б2) та А3(Б3). При цьому в зоні А1 (Б1) спостерігається зниження (А1) або сталий рівень (Б1) коерцитивної сили. Подальше збільшення пластичних деформацій до 10% призводить до збільшення КС в усіх зонах із наявністю невеликих екстремумів. Останні можна пояснити перерозподілом залишкових напружень у зразку під час нагартування одних зон та пластичного деформування інших. Спочатку відбувається пластична течія зони звуження А1(Б1). Після проходження

площини текучості зона звуження загартується. Потім починається пластична течія зон А2(Б2) та А3(Б3). Причому цей процес не проходить однаково у зон А2(Б2) та А3(Б3). Кожна зона деформується по своєму. Ми спостерігали цей процес під час деформації зразків. Це призводить до складного розподілу пластичних деформацій та відповідно до такого ж складного розподілу залишкових напружень, що викликані деформаціями.

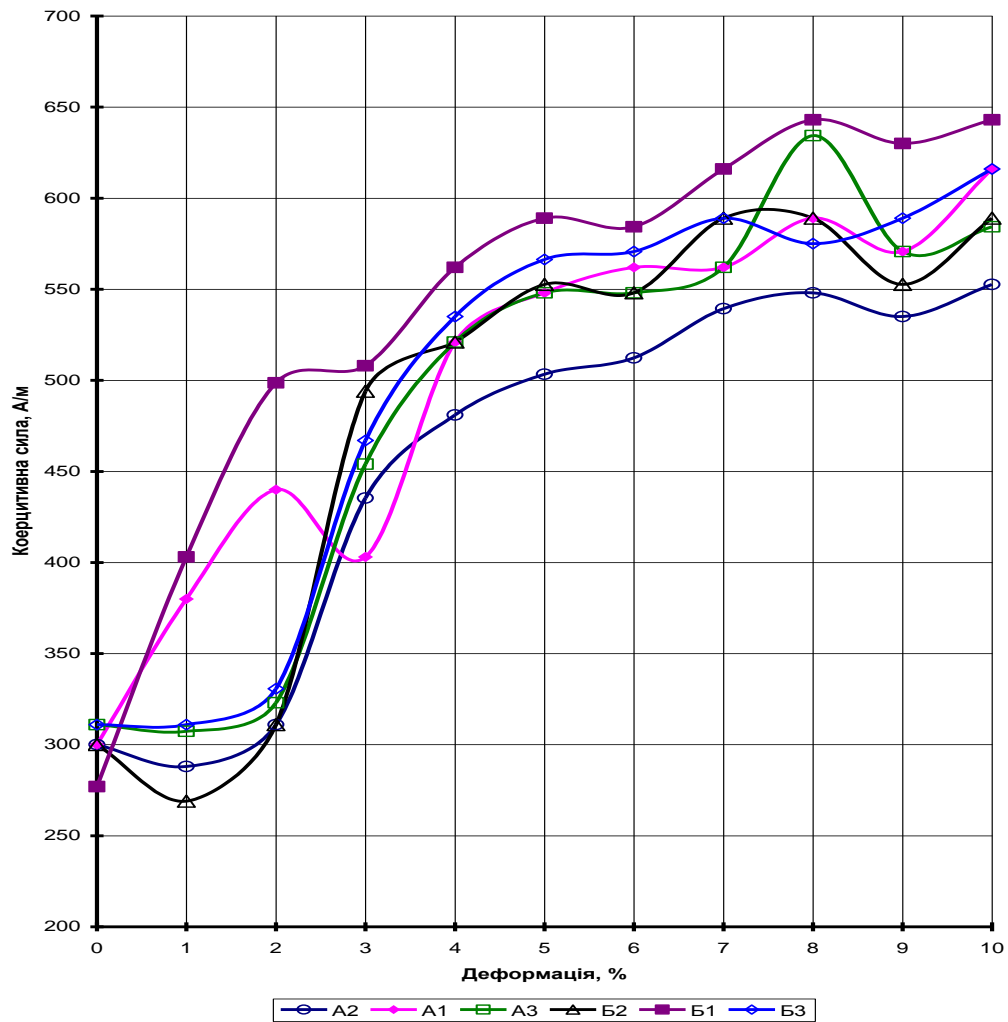


Рис. 2.33 Залежність коерцитивної сили від пластичних деформацій

За результатами аналізу отриманих даних було прийнято рішення про виготовлення нових зразків із відходом від вимог стандарту ГОСТ 1497-84 щоб унеможливити появу пластичних деформацій у неробочій частині зразка, а саме:

- робочу частину зразка виготовити розмірами 60x60 мм;
- неробочу частину зразка виготовити із площею у 3 рази більшою ніж робоча.

Загальний вигляд пакету зразків товщиною по 4 мм із сталі 09Г2С представлено на рис. 2.34

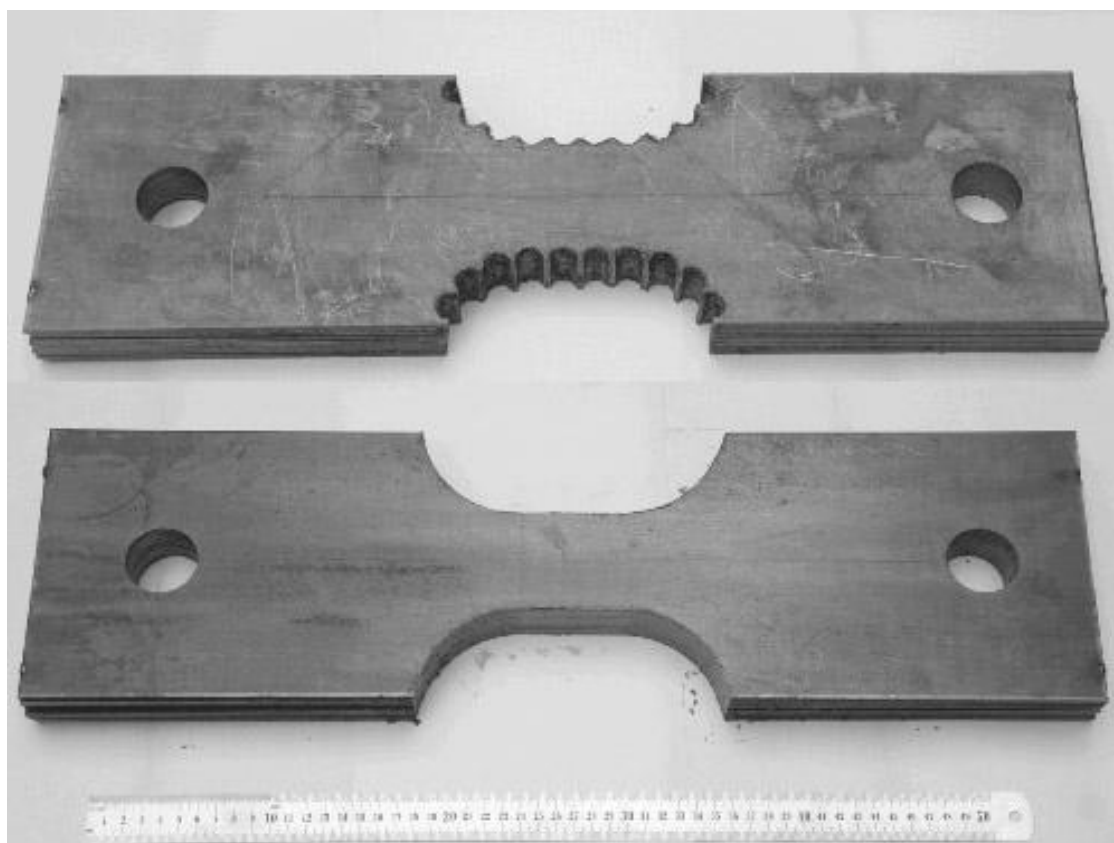


Рис. 2.34 Загальний вигляд зразків

Після пластичного деформування вирізалися шляхом фрезерування центральні частини зразка для отримання прямокутного зразка-балки із розмірами 450x60 мм (рис. 2.36)

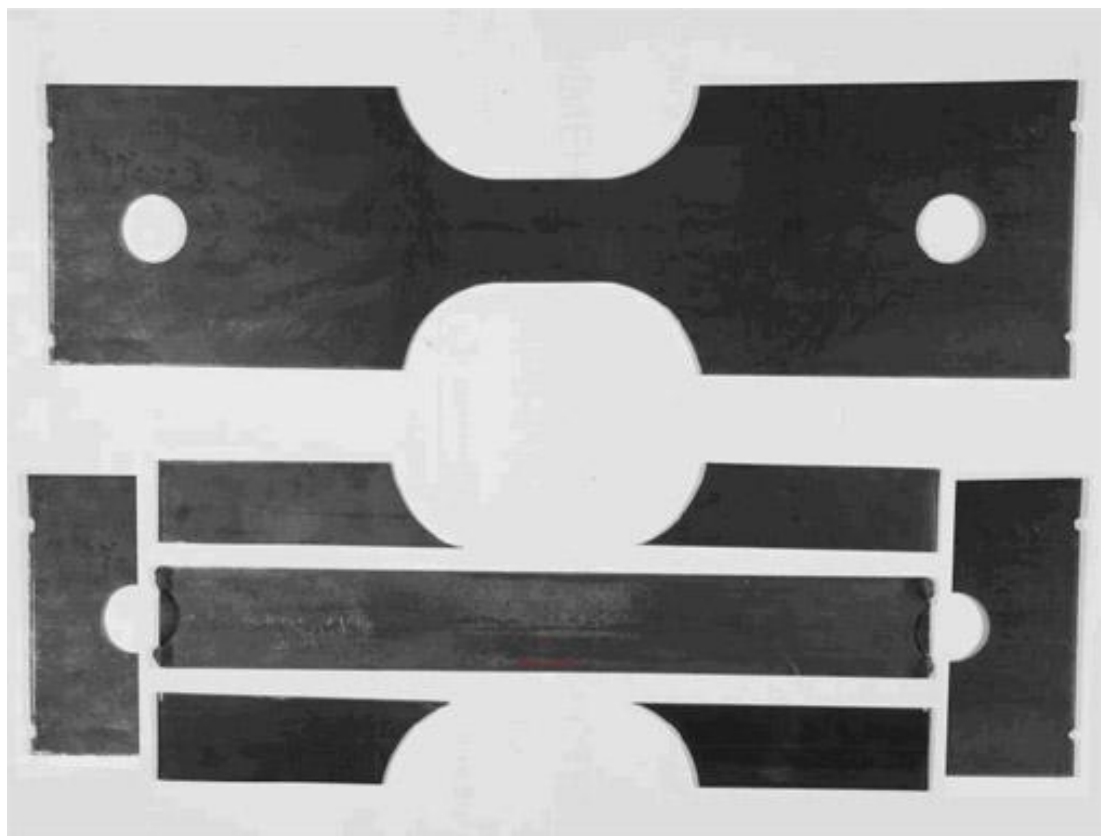


Рис.2.36 Вирізання зразків після пластичного деформування для одновісного навантаження

2.6 Установка для наведення одновісних напружень у плоских зразках

Установки, що широко випускаються промисловістю – це так звані розривні машини. Ці установки завдяки використанню гідравлічного пристрою створюють у зразках напруження, які пропорційні гідравлічному тиску. Гідравлічний тиск за допомогою гідроциліндрів передається на зразок, що призводить до появи необхідних механічних напружень. Навантаження зразка проводять до його розриву. Сила, при якій зразок розірвався, є мірою σ_b . Для цього силу ділять на площу поперечного перерізу зразка. Для визначення діючих напружень також силу, прикладену до зразка (її величину показує розривна машина), ділять на площу поперечного перерізу зразка.

Переважна більшість таких машин вертикальна, що вимагає вертикального закріплення зразка. Однак при роботі машини внаслідок проковзування зразка у затискних губках виникають струси. Закріпити перетворювач на вертикальному зразку досить важко. Для цього використовують гумову стрічку, яка часто намагається перекосити перетворювач. Струси також намагають здвинути перетворювач. Тому використання таких машин є найпростішим, але не найсприятливішим. Є відомості про горизонтальні розривні машини, але в своїй практиці автор з ними не зустрічався.

Треба зауважити, що розривні машини внаслідок створення дуже значних навантажень є досить металоємні та енергоємні. Браком багатьох таких машин є неможливість зупинити навантаження на певний час на певних напруженнях. Тому в практиці використовують багато механічних установок для навантаження зразків.

Досить велике розповсюдження отримали установки зі змінними напруженнями в перерізі зразка. Енергетично легше і найпростіше навантажити зразок за допомогою вигину. Такі установки досить компактні, легкі і можуть використовуватись у настільному варіанті. В них можна зупиняти навантаження в будь-який час завдяки механічному навантаженню.

Нами була використана установка для чистого згину зразка-балки (рис. 2.15, 2.16).

Зразок-балка складався із двох однакових пластин сталі 09Г2С розмірами 450х60х4 мм, що були заварені по торцях сторони 60мм. Один зразок-балка був у стані пластичного деформування, другий - в стані поставки. Зразок-балка після пластичного деформування знаходився знизу в установці чистого вигину (рис. 2.15, 2.16) для наведення напружень розтягу. Жорсткість такого складеного зразка-балки відрізняється від суцільного зразка-балки розмірами 450х60х8 мм. Аналітичне рішення прогину такого складеного зразка-балки не є очевидним, тому було прийнято рішення експериментального визначення прогину та наведених напружень на поверхні зразка-балки.

Для цього в середині нижньої пластини складеного зразка-балки свердлили базові отвори на відстані 50 мм діаметром 1 мм. Навантажували зразок-балку і за допомогою механічного деформометру із часовою головкою із ціною поділки 0,001 мм визначали переміщення отворів баз (рис. 2.35).

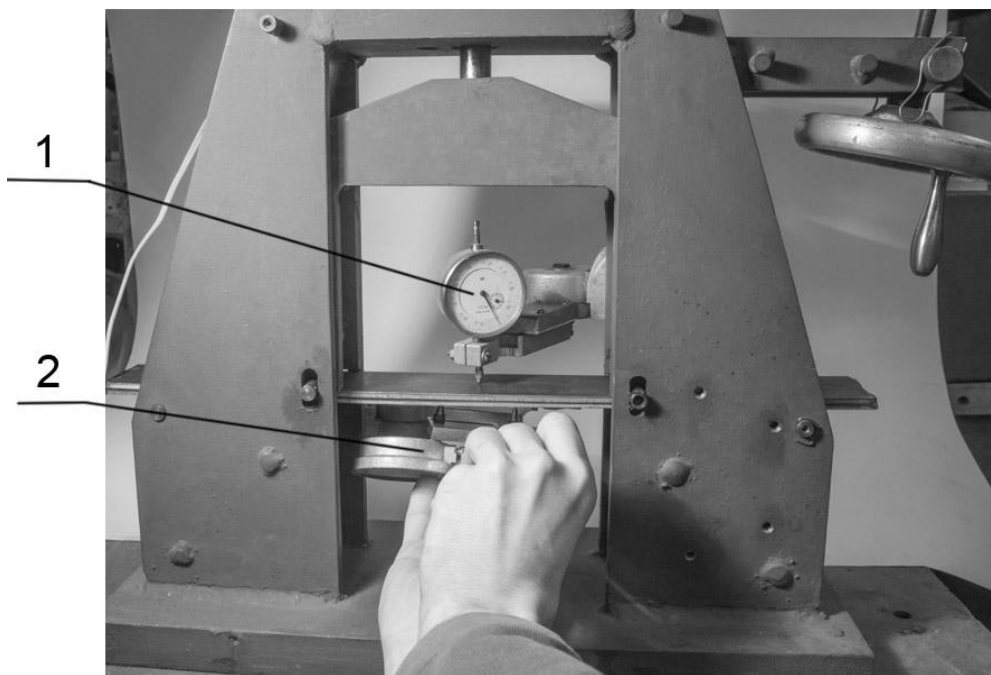


Рис. 2.35. Градування складено зразка-балки. 1- індикатор прогину, 2 – деформометр

Потім по залежності (2.7) розраховували напруження. Вимірювання проводили 10 разів із наступним усередненням результатів.

$$\sigma = \frac{l_k - l_n}{l_n} * E, \quad (2.7)$$

де σ – напруження (МПа),

l_n – довжина вимірювальної бази початкова,

l_k – довжина вимірювальної бази після навантаження,

E – модуль пружності

Отримані прогини складеного зразка-балки із відповідними напруженнями наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7. Навантаження плоских зразків-балок 2х4мм

№	Максимальний прогин, мм	Напруження, МПа
1	0	0
2	1,11	32
3	2,22	64
4	3,33	96
5	4,44	128
6	5,55	160
7	6,66	192
8	7,77	224

2.7 Методика та засоби досліджень сигналів методів МА та ПП на моделі зварних з'єднань

Для дослідження сигналів методів МА та ПП на зварному з'єднанні (далі - ЗЗ) необхідно отримати ЗЗ із рівномірними властивостями, напруженнями та деформаціями. Однак зварювання відповідно до ДСТУ ISO 3834-2001 є спеціальним процесом і характеризується невизначеним результатом. Неможливо зварити два однакових зварних шва.

Нами було запропоновано дослідження сигналів методів МА та ПП на ЗЗ з використанням моделі ЗЗ – пластини із прорізами [129]. На відміну від реального ЗЗ пластина із прорізами як раз характеризується постійними властивостями, напруженнями та деформаціями.

Пластини із прорізами були виготовлені із листової сталі 09Г2С товщиною 4 мм. Довжина зразків становила 200 мм, ширина прорізів 40 мм, довжина прорізів 110 мм, ширина пластини варіювалась від 93 мм до 287 мм (рис. 2.37)

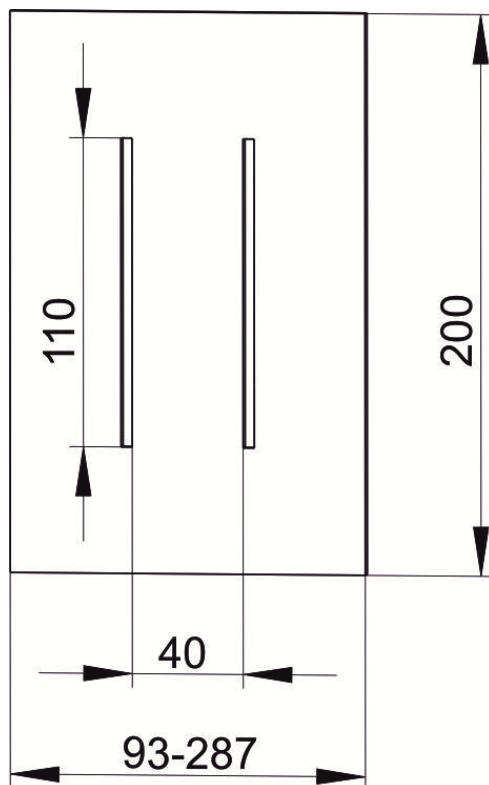


Рис. 2.37 Пластина із прорізами

Середню частину пластини із прорізами нагрівали газовим пальником із пропано-кисневим полум'ям пальником №7. Контроль температури нагріву здійснювали за допомогою цифрового пірометра Raytec PM Plus рис.2.XX . Для запобігання нагріванню інших частин (крім центральної) було розроблено та виготовлено спеціальний водяний холодильник (рис. 2.38). Холодильник виготовлено із алюмінієвого сплаву АМГ6. Його центральне вікно відкриває зону із прорізами та закриває всі інші. Холодильників було виготовлено два для використання з кожної сторони пластини (рис.2.39).



Рис.2.38. Вимірювання температури нагріву центральної частини пластини із прорізами за допомогою пірометра Raytec PM Plus

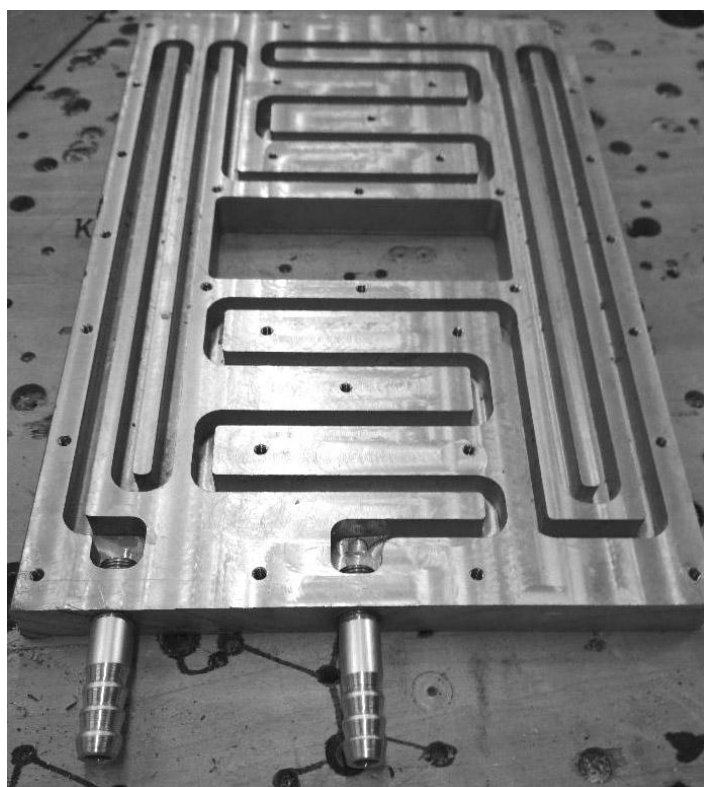


Рис.2.39. Холодильник (вигляд водяних каналів охолодження)

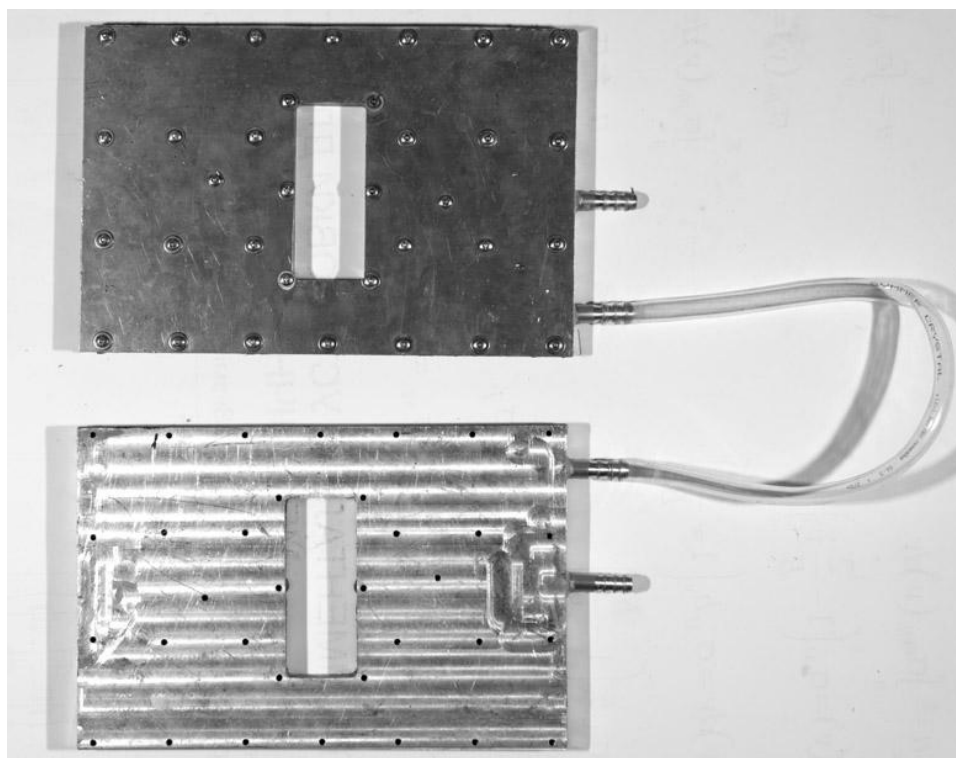


Рис. 2.40 Холодильники для пластини із прорізами

Нагрівання пластини із прорізами проводили з однієї сторони до температури вище 600°C (реально $750\text{--}850^{\circ}\text{C}$) із витримкою 2 хв. для більш рівномірного розподілу тепла по товщині пластини. Для зменшення термічного впливу на холодильник застосували термічний екран із нержавіючої сталі 08X12H10T товщиною 1 мм (рис. 2.42. 2.43)

Контроль деформацій здійснювався механічним деформометром по заздалегідь просвердленим базовим отворах до нагрівання, після нагрівання та після розрізання прорізів для вивільнення залишкових напружень. Це дало змогу визначити пластичні деформації (2.8) та залишкові напруження (2.9). Вигляд пластин із прорізами після розрізання наведено на рис.2.44.

Для перевірки рівномірності напружень та деформацій було виготовлено експериментальний зразок пластини із прорізами шириною 300 мм. В кожній частині пластини були просвердлені наскрізні базові отвори (база 80 мм) діаметром 1 мм по 3 бази на кожену частину. Кожну базу вимірювали по 3 рази із наступним усередненням результатів (рис. 2.41).

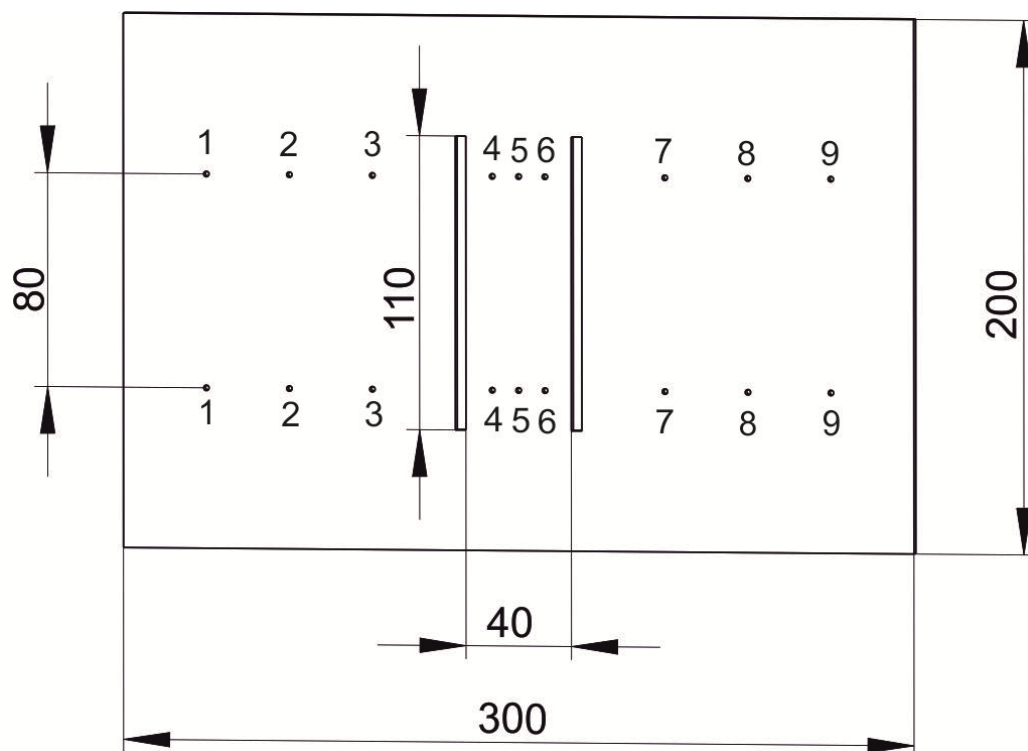


Рис. 2.41 Експериментальний зразок пластини із прорізами шириною 300 мм



Рис. 2.42 Термічний екран

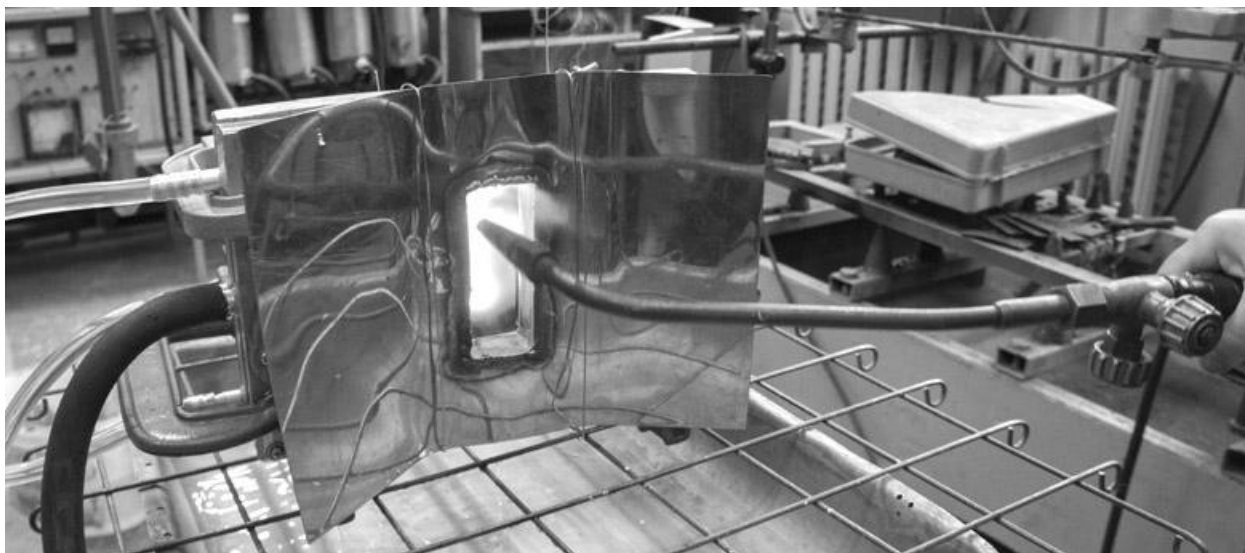


Рис.2.43 Процес нагрівання центральної частини пластини із прорізами

Проводили заміри баз перед нагріванням l_1 , після нагрівання l_2 та після вивільнення центральної частини l_3 (вивільнення залишкових напружень) шляхом механічного розрізання (продовження прорізів в одну сторону рис.2.44).

Пластичні деформації розраховували по формулі:

$$\varepsilon_{пл} = \frac{l_3 - l_1}{l_1} * 100\% , \quad (2.8)$$

де $\varepsilon_{пл}$ – пластична деформація у %;

l_1 – довжина вимірювальної бази початкова;

l_2 – довжина вимірювальної бази після нагріву;

l_3 – довжина вимірювальної бази після розрізання.

Напруження розраховували по формулі:

$$\sigma = \frac{l_2 - l_3}{l_2} * E , \quad (2.9)$$

σ – напруження (МПа),

E – модуль пружності.

Результати вимірів деформацій та напружень експериментального зразка пластини із прорізами наведено у таблицях 2.8 та 2.9.

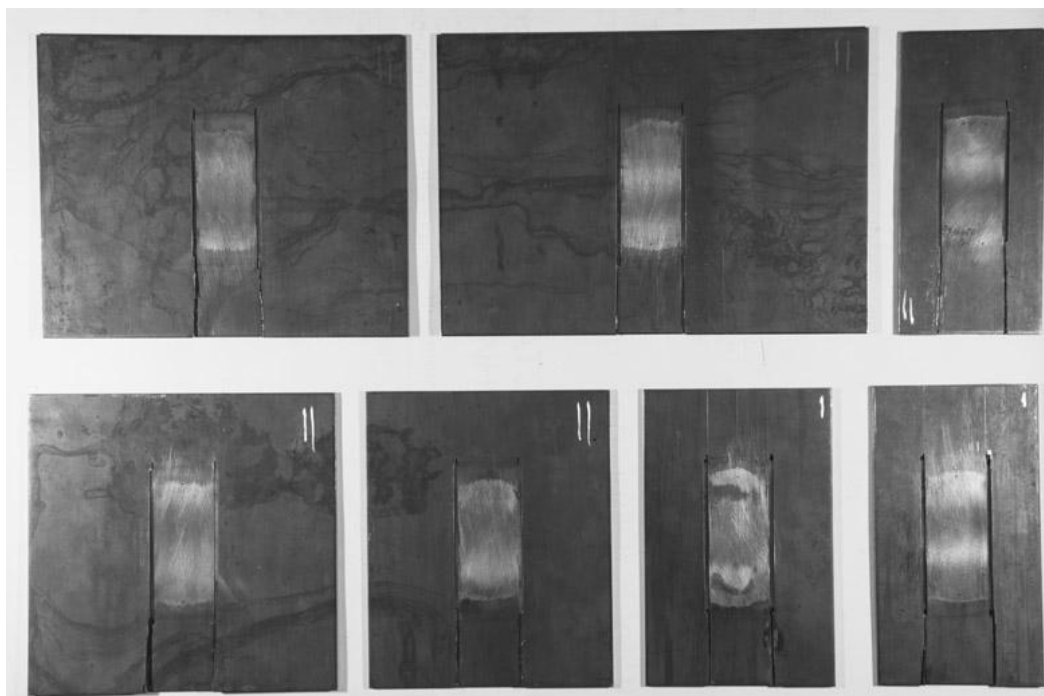


Рис.2.44 Розрізані пластини із прорізами

Після нагрівання центральну частину пластини із прорізами шліфували вручну наждачним папером для зняття окалини.

Таблиця 2.8 Пластичні деформації експериментального зразка пластини із прорізами, %

	№ бази								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сторона 1				-0,531	-0,575	-0,575			
Сторона 2				-0,556	-0,581	-0,6			

Таблиця 2.9 Залишкові напруження експериментального зразка пластини із прорізами, МПа

	№ бази								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сторона 1	25	-25	-112,5	250	250	250	-125	-25	25
Сторона 2	62,5	0	-75	287,5	287,5	287,5	-87,5	0	37,5

Бази № 4,5,6 відповідають центральній частині пластини із прорізами, що імітує зварний шов. Бази № 1,2,3 відповідають частині під холодильником зліва, а бази №7,8,9 відповідають частині під холодильником з права. Видно, що центральна частина пластини із прорізами (бази № 4,5,6), яка нагрівалася, має рівномірні пластичні деформації та залишкові напруження.

Цей експеримент дозволив у подальшому використовувати тільки одну базу по середині центральної частини пластини із прорізами. Вимірювання деформацій проводили з обох сторін пластини.

Висновки до розділу 2

А) Вибрано матеріал для дослідження - сталь 09Г2С.

В) Розроблена методика досліджень сигналів магнітоанізотропним методом та методом параметрів перемагнічування на плоских зразках.

С) Розроблені експериментальні установки для досліджень параметрів магнітоанізотропним методом та методом параметрів перемагнічування від впливу пластичних деформації та напружень.

Д) Розроблено установки для наведення пластичних деформацій стиснення, розтягу у плоских зразках.

Е) Розроблено установки для наведення напружень розтягу у плоских зразках.

Ф) Розроблено зразки моделі зварного з'єднання – пластини із прорізами. Досліджено рівномірність залишкових пластичних деформацій та напружень в частині, що імітує пластичну зону зварного шва.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ МЕТОДІВ ВІД ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ТА НАПРУЖЕНЬ

3.1 Експериментальні дослідження сигналів магнітоанізотропного перетворювача від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій стиснення

Зразки довжиною 450 мм, шириною 60 мм та товщиною 4 мм із сталі 09Г2С зажималися в пристосуваннях (рис. 2.15-2.17). Середня частина зразка нагрівалась до температур вище 600°C (650-750°C) газовим пальником із пропано-кисневим полум'ям (рис. 3.1). Деформування зразка відбувалося за допомогою гвинта 5 (рис. 2.17). Кожен зразок деформувався один раз. Наведені пластичні деформації стиснення склали 0,64%, 1,24%, 1,7%.



Рис. 3.1 Нагрівання та пластичне деформування стисненням зразка

Результати експериментальних досліджень сигналів магнітоанізотропного перетворювача від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій стиснення представлені на рис. 3.2 - 3.8.

Видно, що перша гармоніка A_1 (рис. 3.2) магнітоанізотропного перетворювача при відсутності пластичного деформування з початку зменшується до 64 МПа, а потім із 96 МПа починає зростати. Таку поведінку A_1 можна пояснити наявністю залишкових напружень стиснення в металі пластини. Із появою 0,64% пластичної деформації A_1 монотонно зростає. Із наведенням 1,24% та 1,7% майже монотонно зменшується. В разі коли відомо ступінь пластичного деформування по представленим залежностям можливо визначити залишкові напруження.

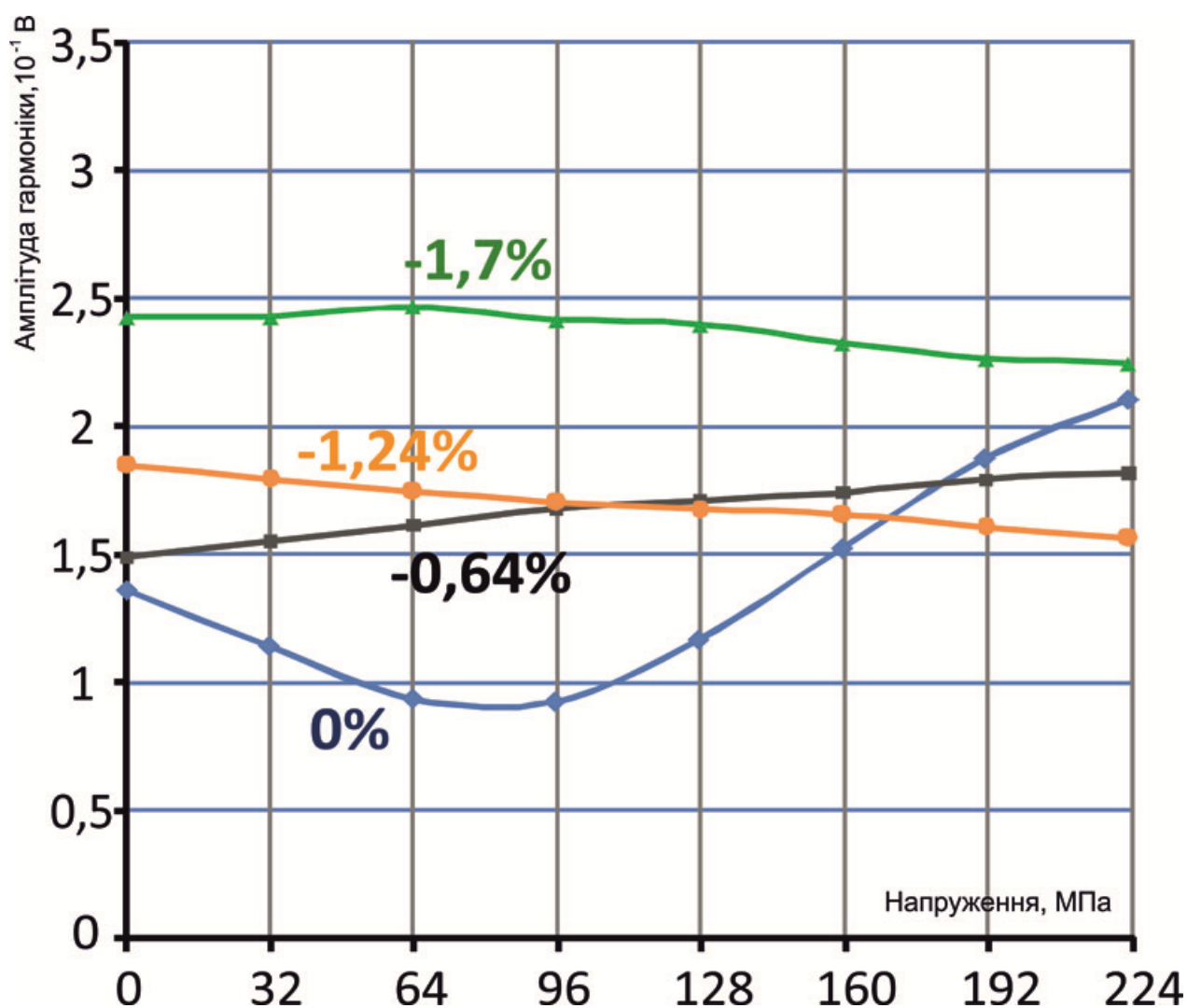


Рис. 3.2 Залежність першої гармоніки A_1 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення

Друга гармоніка A2 (рис. 3.3) при відсутності пластичних деформацій має спадаючий характер, а при появі пластичних деформацій має дуже незначні зміни. Очевидно, що цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

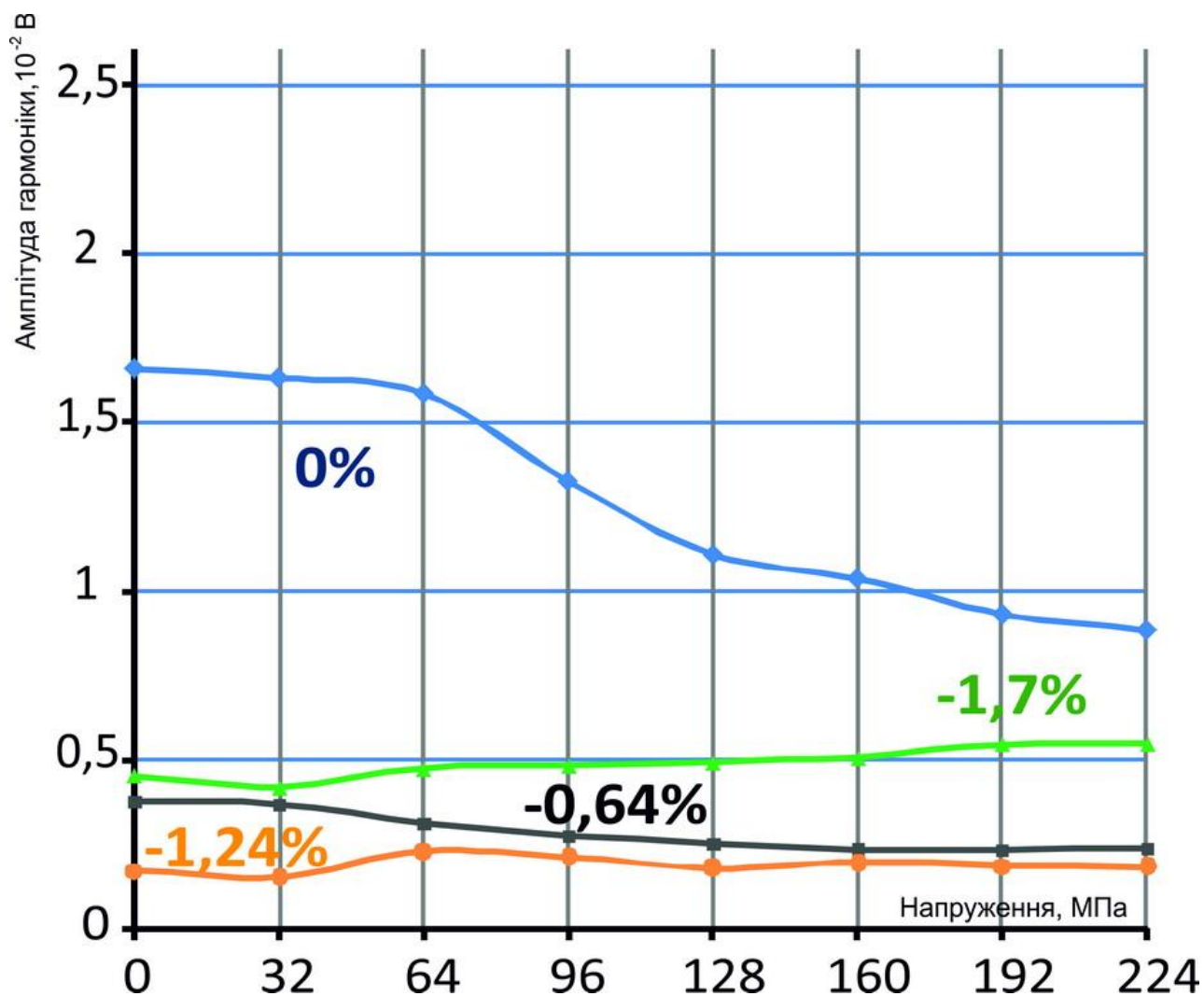


Рис. 3.3 Залежність другої гармоніки A2 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення

Третя гармоніка АЗ (рис. 3.4) при відсутності пластичних деформацій до 64 МПа має повільно зростаючий характер, а потім (96 МПа) починає зростати швидше. При появі пластичних деформацій АЗ має повільно зростаючий характер. В разі коли відомо ступінь пластичного деформування по представленим залежностям можливо визначити залишкові напруження.

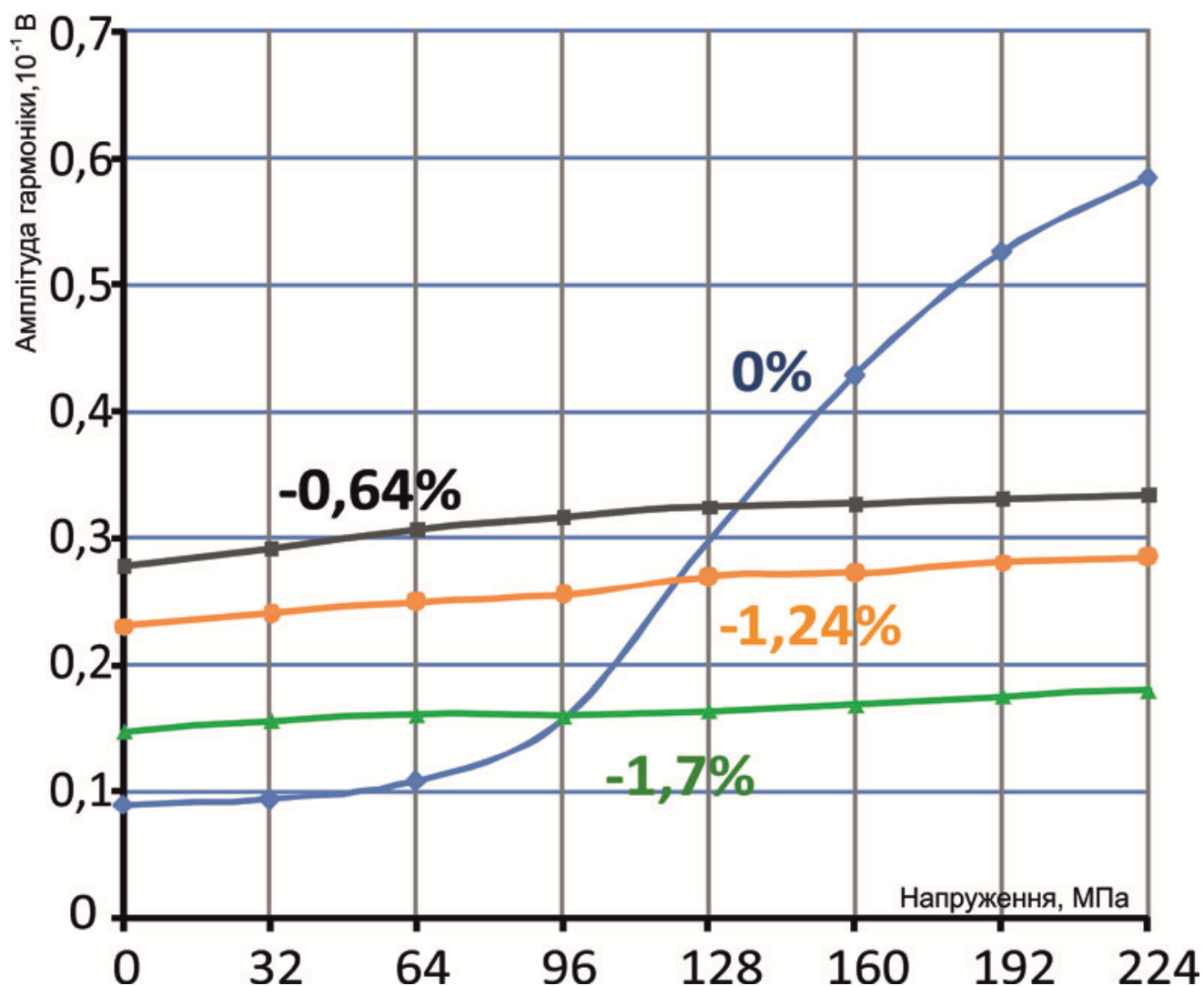


Рис. 3.4 Залежність третьої гармоніки АЗ сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення

Четверта гармоніка А4 (рис. 3.5) при відсутності пластичних деформацій має спадаючий характер (до 128 МПа повільний, далі більш стрімкий), а при появі пластичних деформацій має дуже незначні зміни. Очевидно, що цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

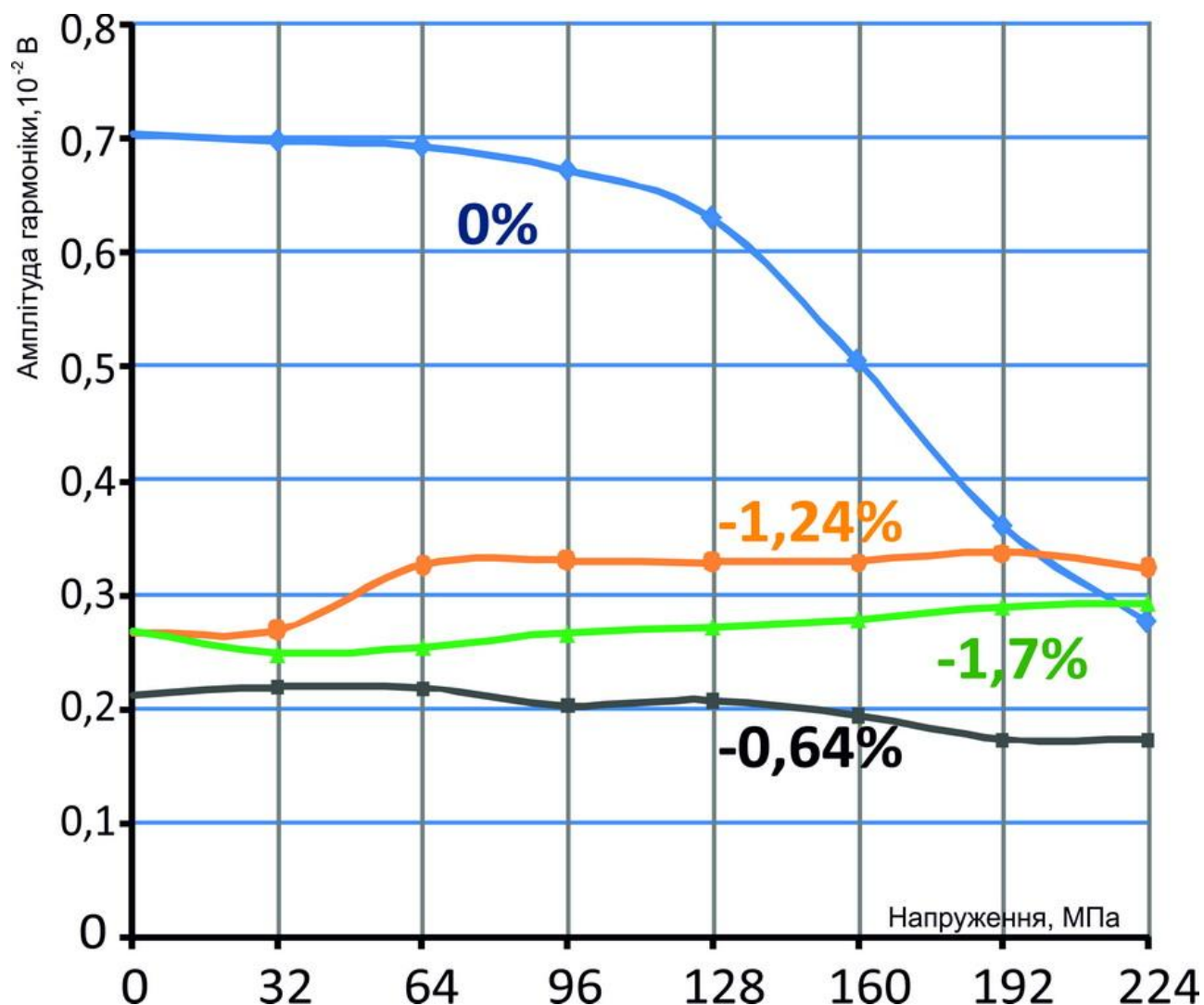


Рис. 3.5 Залежність четвертої гармоніки А4 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення

П'ята гармоніка А5 (рис. 3.6) при відсутності пластичних деформацій має зростаючий характер (до 64 МПа повільно, потім до 160 МПа стрімко, далі знов повільно), а при появі пластичних деформацій має дуже незначні зміни. Очевидно, що цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

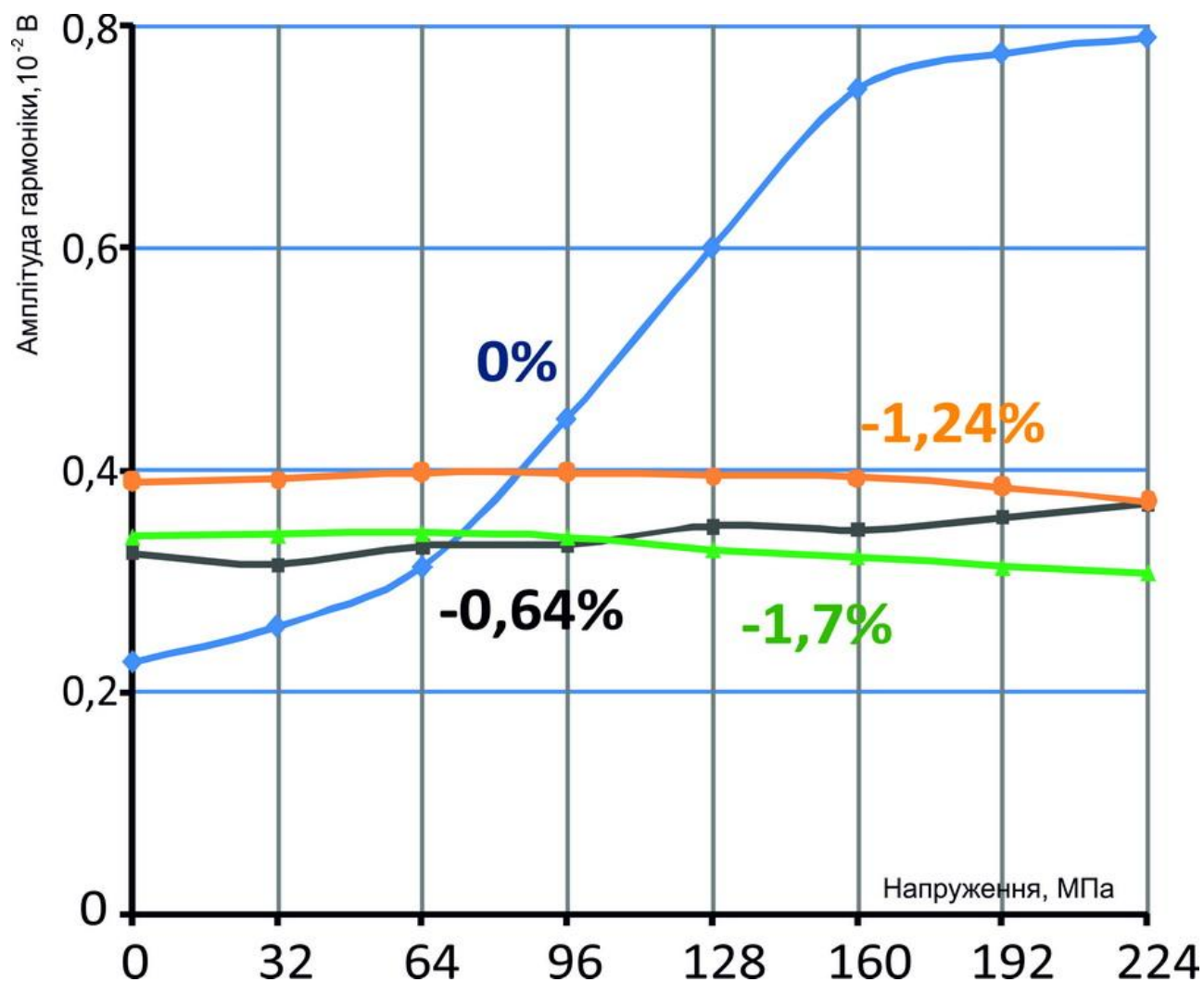


Рис. 3.6 Залежність п'ятої гармоніки А5 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення

Шоста гармоніка A_6 (рис. 3.7) при відсутності пластичних деформацій має спадаючий характер. При появі пластичних деформацій залежності A_6 має добре виражений характер. При напруженнях більших від 64 МПа криві мають добре виражений характер. В разі коли відомо ступінь пластичного деформування по представленим залежностям можливо визначити залишкові напруження.

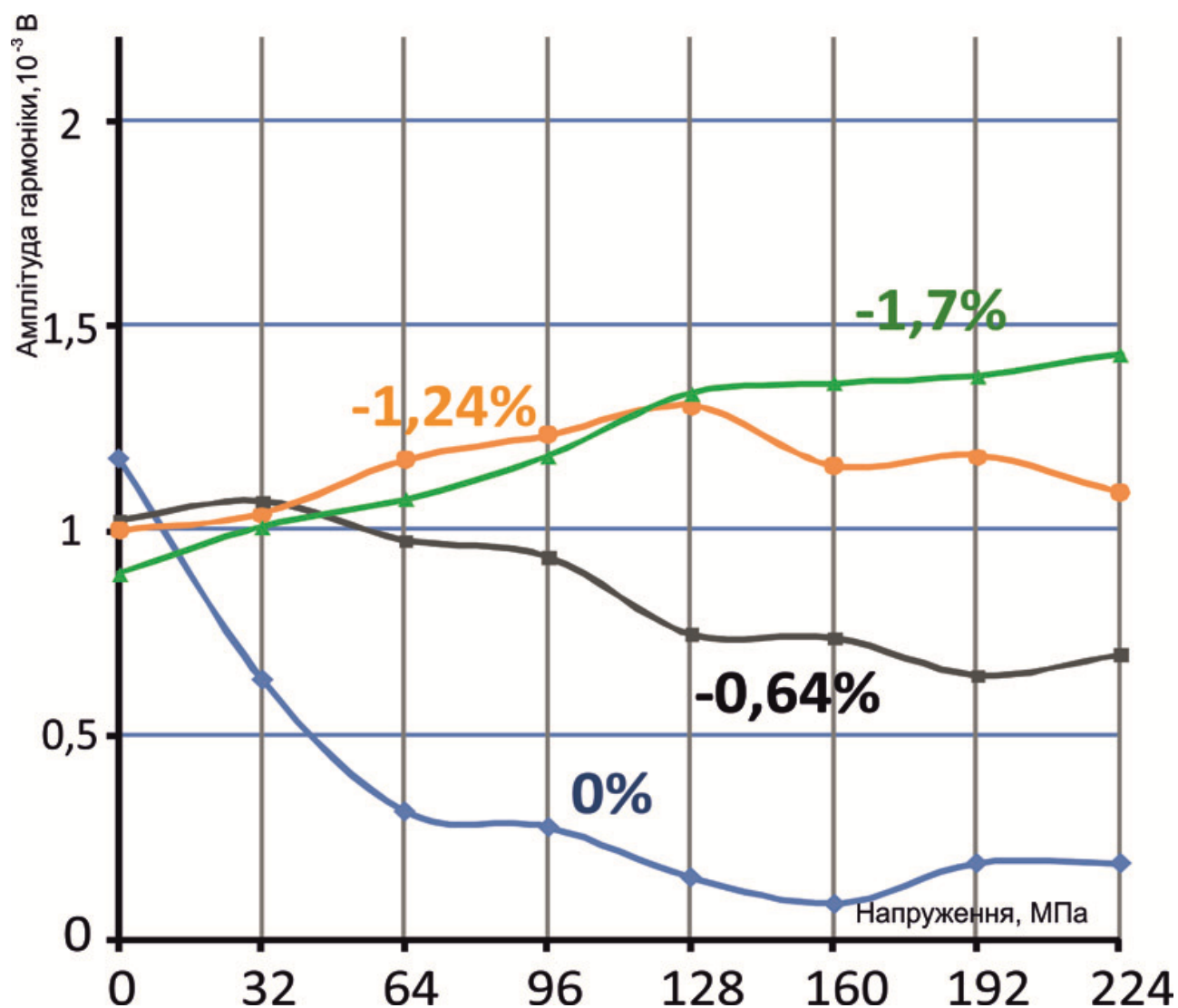


Рис. 3.7 Залежність шостої гармоніки A_6 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення

Фаза першої гармоніки A1 при відсутності пластичного деформування має спадаючий характер (рис. 3.8), а при появі пластичних деформацій має дуже незначні зміни. Очевидно, що цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

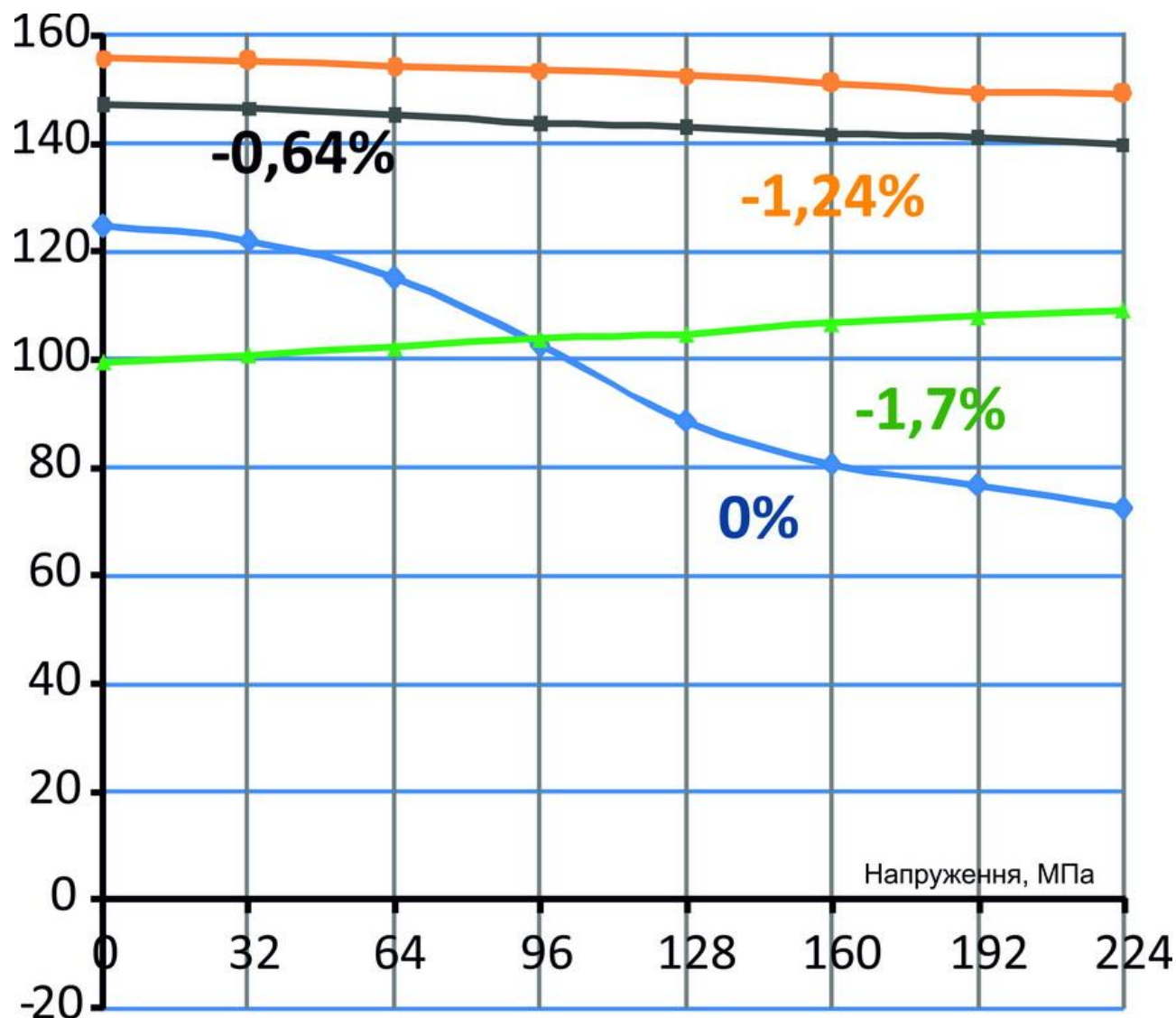


Рис. 3.8 Залежність фази першої гармоніки сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення

3.2 Експериментальні дослідження сигналів перетворювача параметрів перемagnetування від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій стиснення

Результати експериментальних досліджень сигналів перетворювача параметрів перемagnetування від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій стиснення представлені на рис 3.8- 3.12.

Параметр H_{max} (рис. 3.9) при відсутності пластичних деформацій має незначний спадаючий характер і не є інформативним. При появі пластичних деформацій залежності H_{max} мають слабо виражений характер, але всі вони відрізняються по величині сигналу (чим більше пластичне деформування, тим більший сигнал параметра H_{max}).

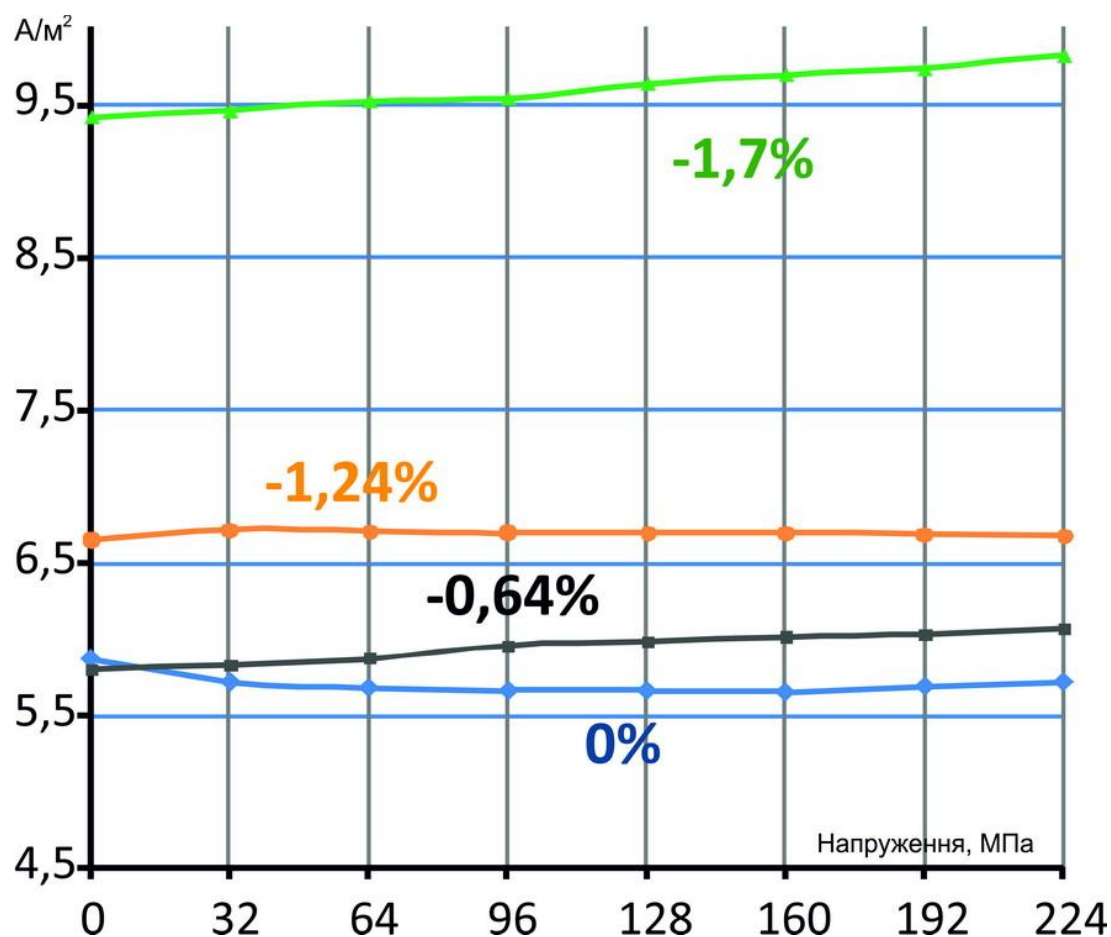


Рис. 3.9 Залежність параметру H_{max} перетворювача параметрів перемagnetування від напружень та пластичних деформацій стиснення

По представленим залежностям неможливо визначити діючі напруження, але визначити пластичні деформації цілком можливо.

Параметр B_{\max} (рис. 3.10) при відсутності пластичних деформацій має невиражений характер і не є інформативним. При появі пластичних деформацій залежності B_{\max} мають слабо виражений характер, але всі вони відрізняються по величині сигналу. Нажаль величина сигналу при різних ступенях пластичного деформування є хаотичною. По представленим залежностям неможливо визначити діючі напруження та пластичні деформації.

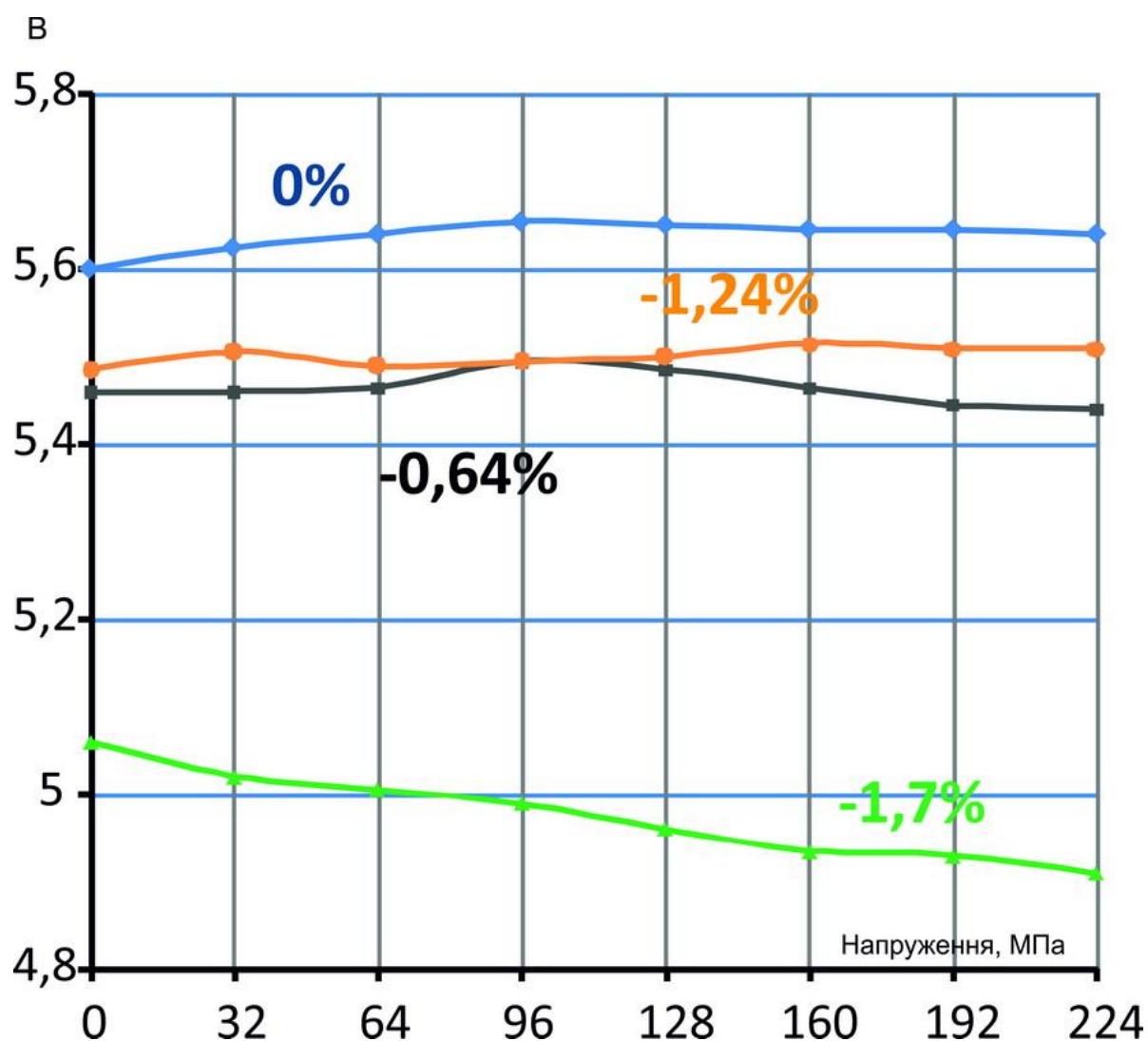


Рис. 3.10 Залежність параметру B_{\max} перетворювача параметрів переміщення від напружень та пластичних деформацій стиснення

Параметр H (рис. 3.11) при відсутності пластичних деформацій має спадаючий характер. При появі пластичних деформацій залежності H мають слабо виражений характер, але всі вони відрізняються по величині сигналу. Нажаль величина сигналу при різних ступенях пластичного деформування є хаотичною. По представленим залежностям неможливо визначити діючі напруження та пластичні деформації.

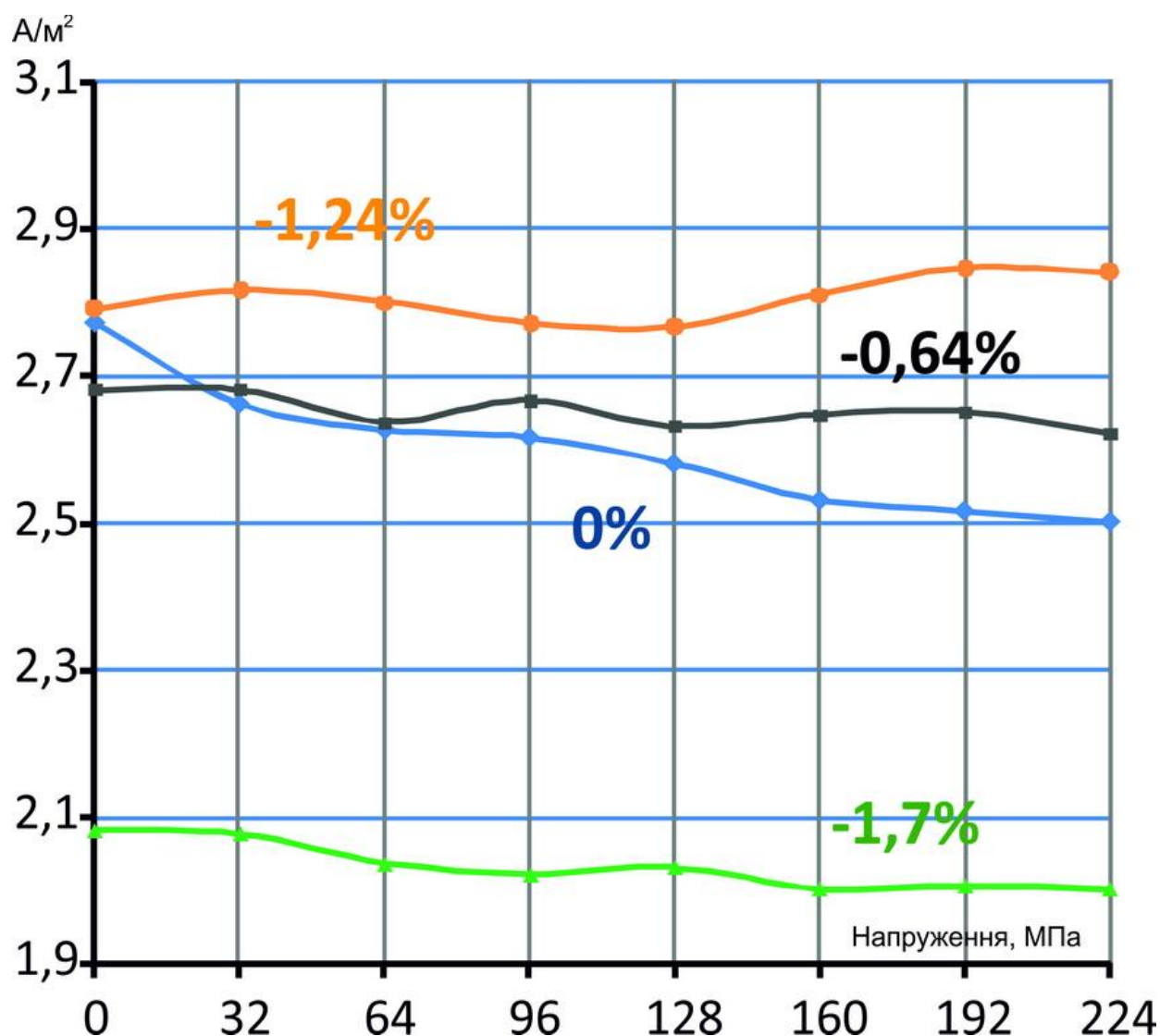


Рис. 3.11 Залежність параметру H перетворювача параметрів перемангнічування від напружень та пластичних деформацій стиснення

Параметр В (рис. 3.12) при відсутності пластичних деформацій має невиражений характер і не є інформативним. При появі пластичних деформацій залежності В мають слабо виражений характер, але всі вони відрізняються по величині сигналу (чим більше пластичне деформування тим менший сигнал параметра Нтах). По представленим залежностям неможливо визначити залишкові напруження, але визначити пластичні деформації цілком можливо.

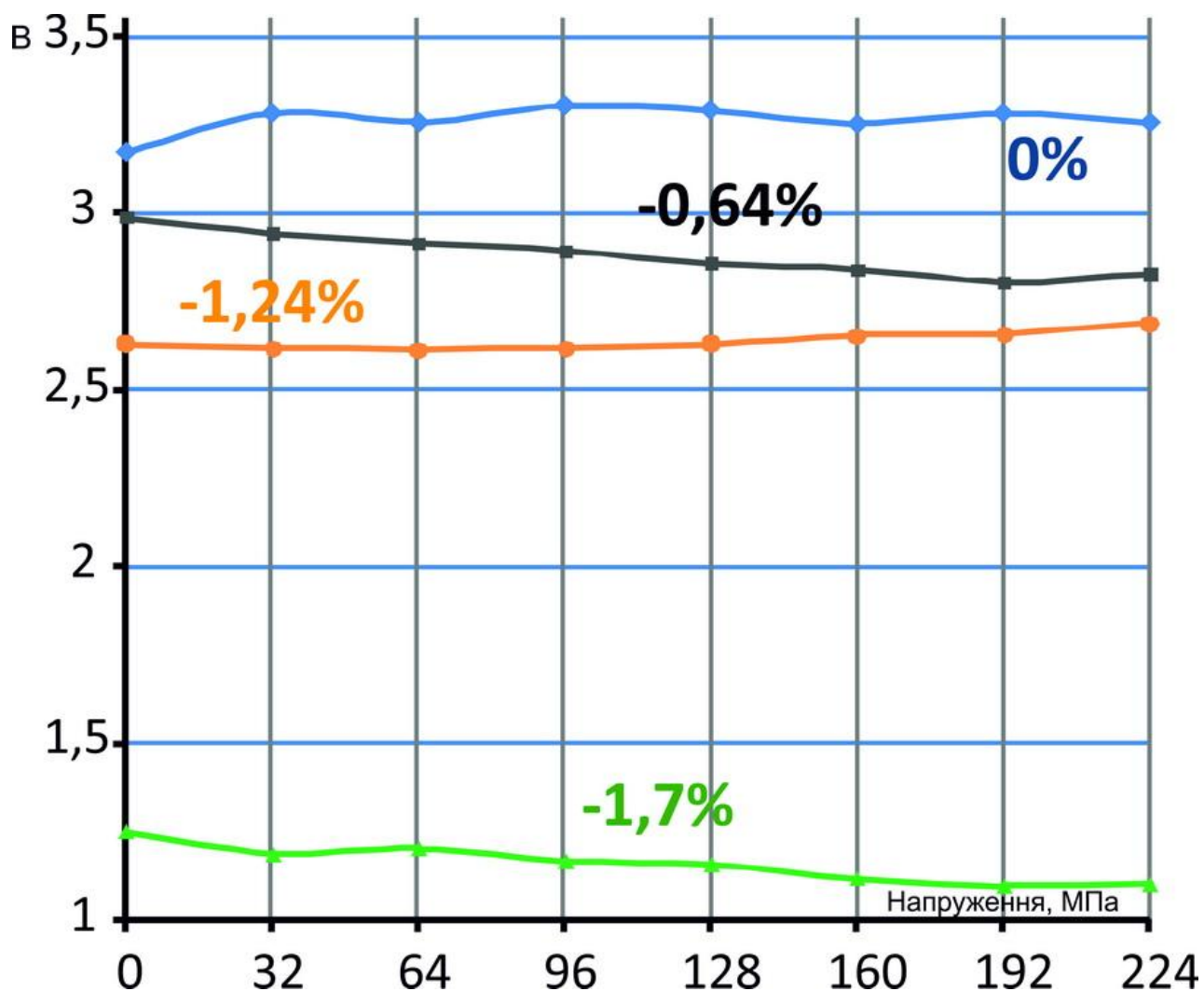


Рис. 3.12 Залежність параметру В перетворювача параметрів перемagnetичування від напружень та пластичних деформацій стиснення

Площа петлі магнітного гістерезису (параметр S) (рис. 3.13) при відсутності пластичних деформацій має незначний спадаючий характер. При появі пластичних деформацій залежності S мають спадаючі характери. Залежності 0,64%, 1,24% , майже не відрізняються по величині сигналу. Залежність 1,7% пластичної деформації є спадаючою та значно відрізняється по величині сигналу. По представленим залежностям неможливо визначити діючі напруження та пластичні деформації до 1.24%.

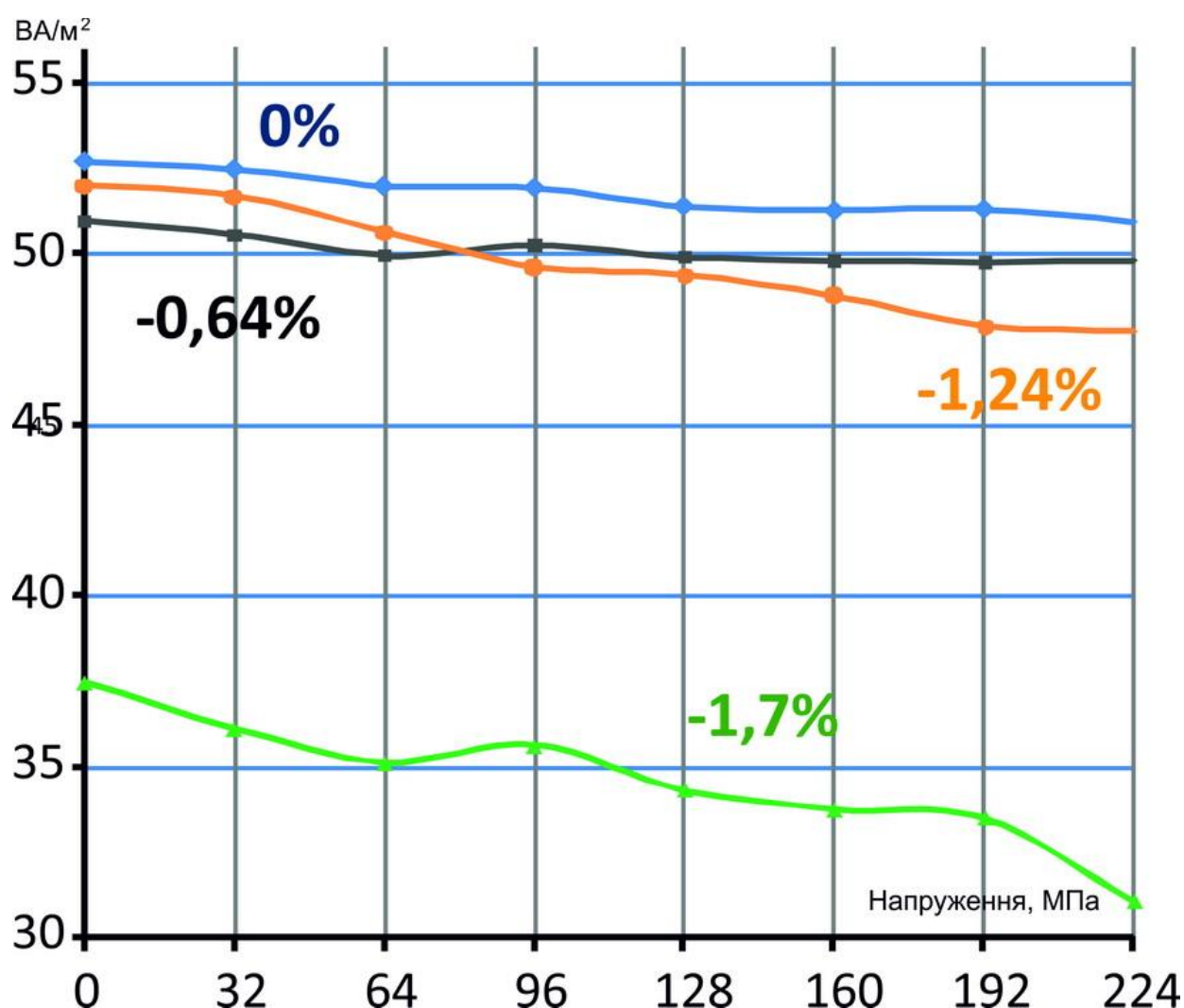


Рис. 3.13 Залежність параметру S перетворювача параметрів переманічування від напружень та пластичних деформацій стиснення

3.3 Експериментальні дослідження сигналів магнітоанізотропного перетворювача від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій розтягу

Результати експериментальних досліджень сигналів магнітоанізотропного перетворювача від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій розтягу представлені на рис 3.14-3.20.

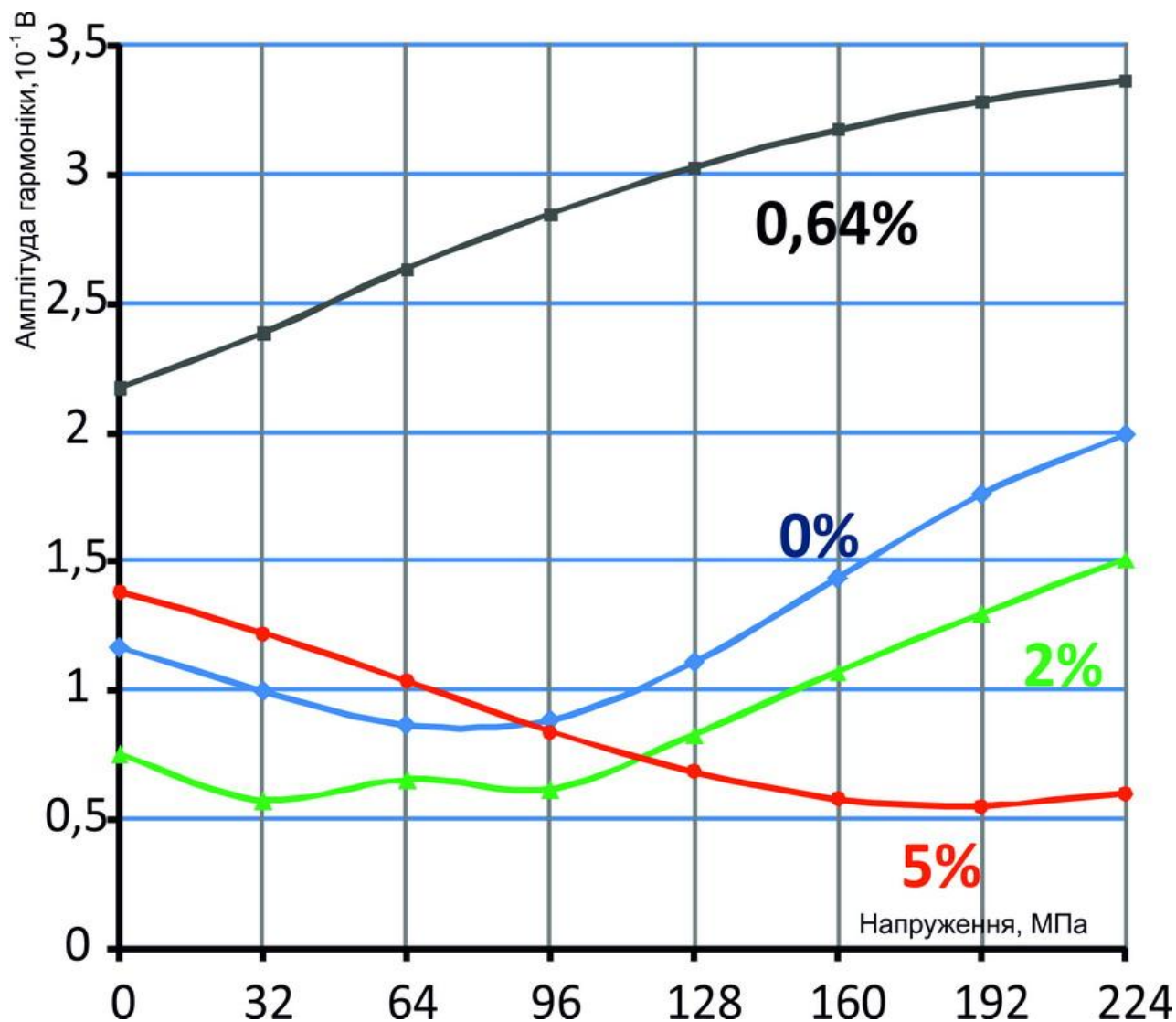


Рис. 3.14 Залежність першої гармоніки A_1 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій розтягу

Видно, що перша гармоніка A_1 (рис. 3.14) магнітоанізотропного перетворювача при відсутності пластичного деформування спочатку зменшується до

64 МПа, а потім із 96 МПа починає зростати. Із появою 0,64% пластичної деформації A1 монотонно добре виражено зростає. Із наведенням 2% деформації починає зростати від 96 МПа, та із 5% деформації майже монотонно зменшується (до рівня 192 МПа), а потім збільшується. Очевидно, що цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

Друга гармоніка A2 (рис. 3.15) при відсутності пластичних деформацій має спадаючий характер (від 64 МПа) та при появі пластичних деформацій теж. Однак рівні сигналів 0%, 0,64% та 2% майже не відрізняються. Тільки залежність 5% дефлорації має значно вищі значення. Очевидно, що цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

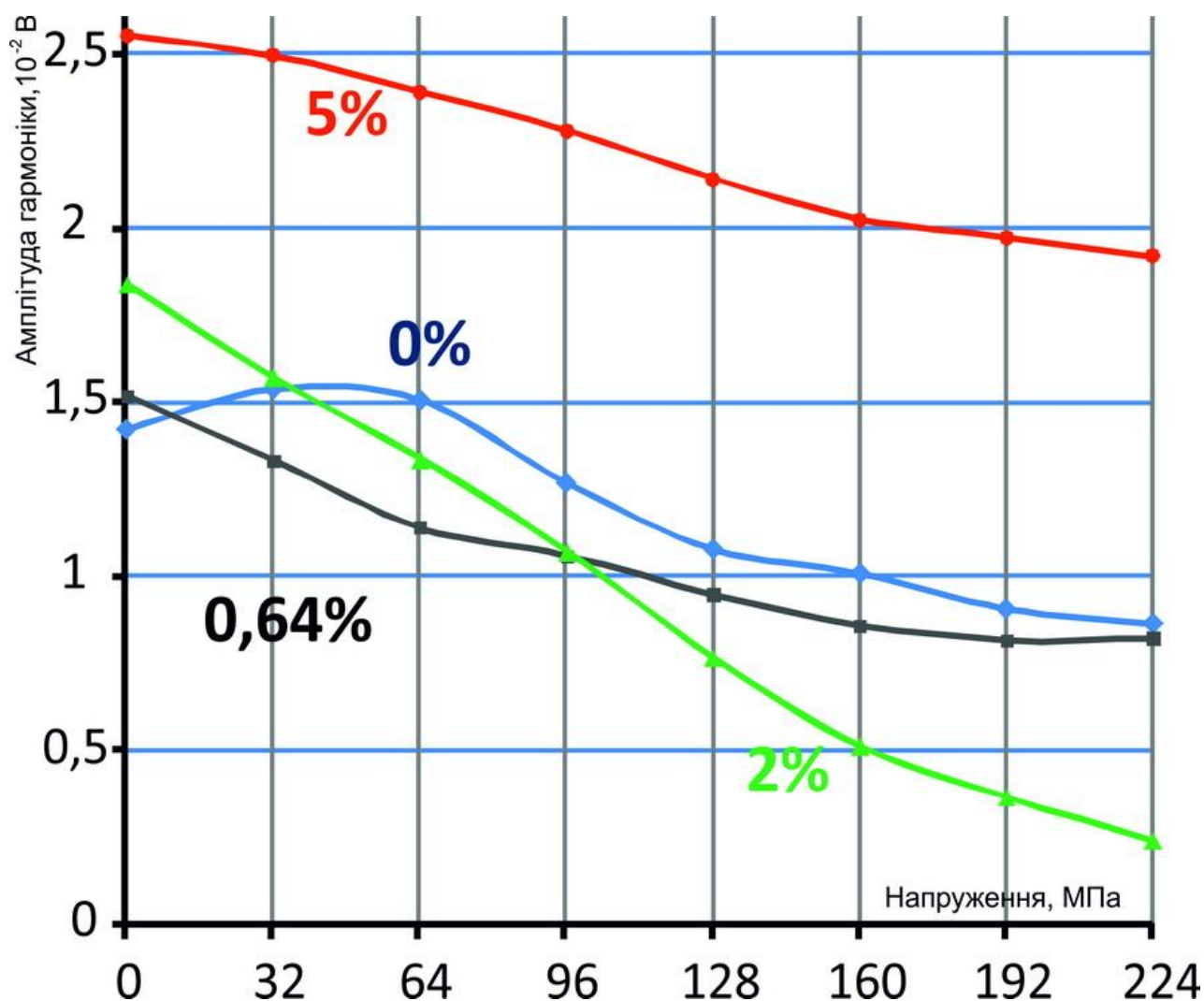


Рис. 3.15 Залежність другої гармоніки A2 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій розтягу

Третя гармоніка АЗ (рис. 3.16) при відсутності пластичних деформацій має зростаючий характер (до 96 МПа повільно, а потім швидше). При появі пластичних деформацій АЗ має дуже значні зміни. Однак рівні сигналів мають хаотичний характер. Очевидно, що і цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

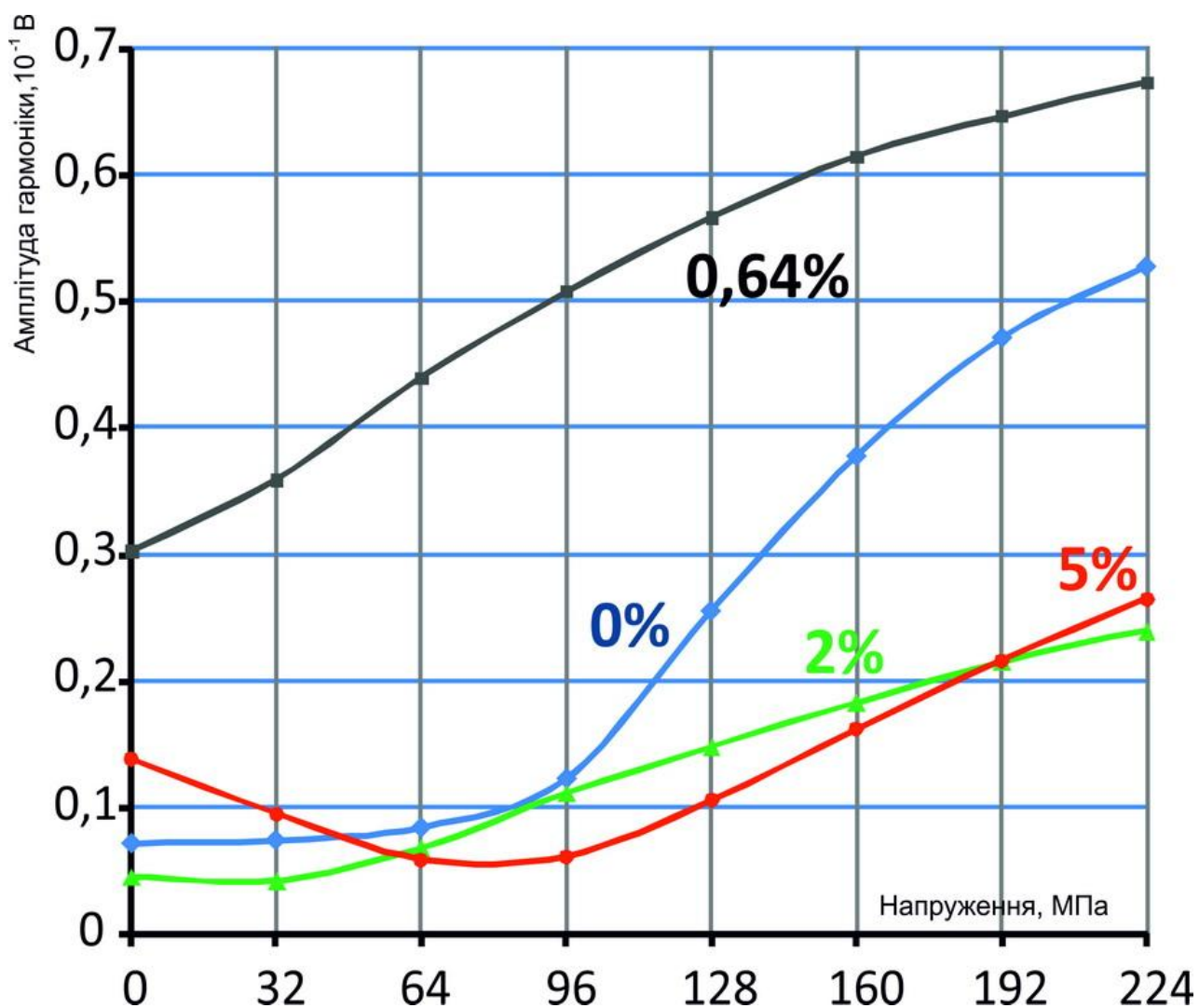


Рис. 3.16 Залежність третьої гармоніки АЗ сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій розтягу

Четверта гармоніка А4 (рис. 3.17) при відсутності пластичних деформацій має спадаючий характер (до 128 МПа повільний, далі більш стрімкий), а при появі пластичних деформацій має незначні зміни (крім 5%). Однак рівні сигналів мають хаотичний характер. Очевидно, що цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

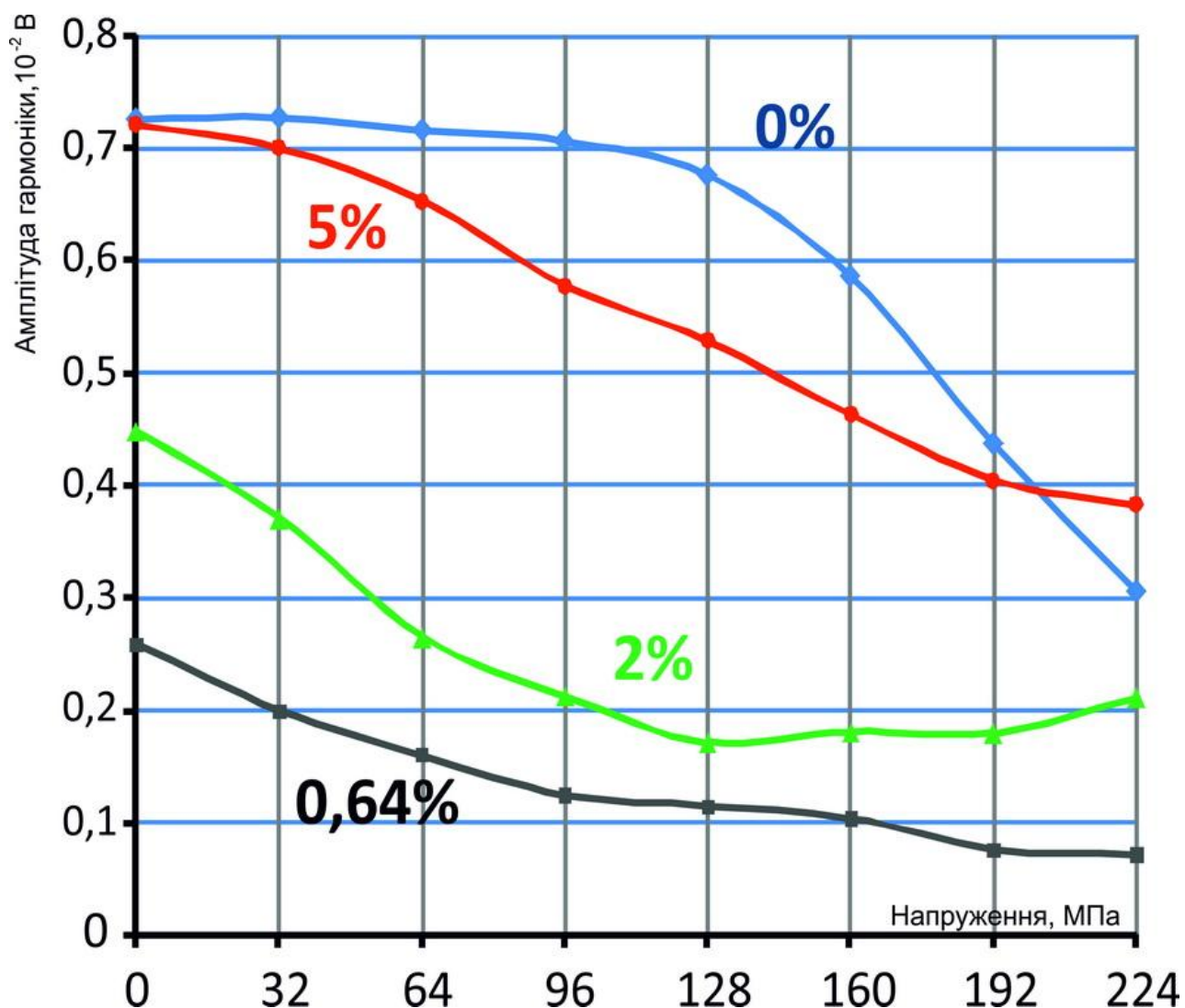


Рис. 3.17 Залежність четвертої гармоніки А4 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій розтягу

П'ята гармоніка А5 (рис. 3.18) при відсутності пластичних деформацій має добрий зростаючий характер, він не змінюється при появі пластичних деформацій. Тільки 5% деформація має спочатку спадання до 96МПа а, а потім зростає. Рівні сигналів мають хаотичний характер. Очевидно, що цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

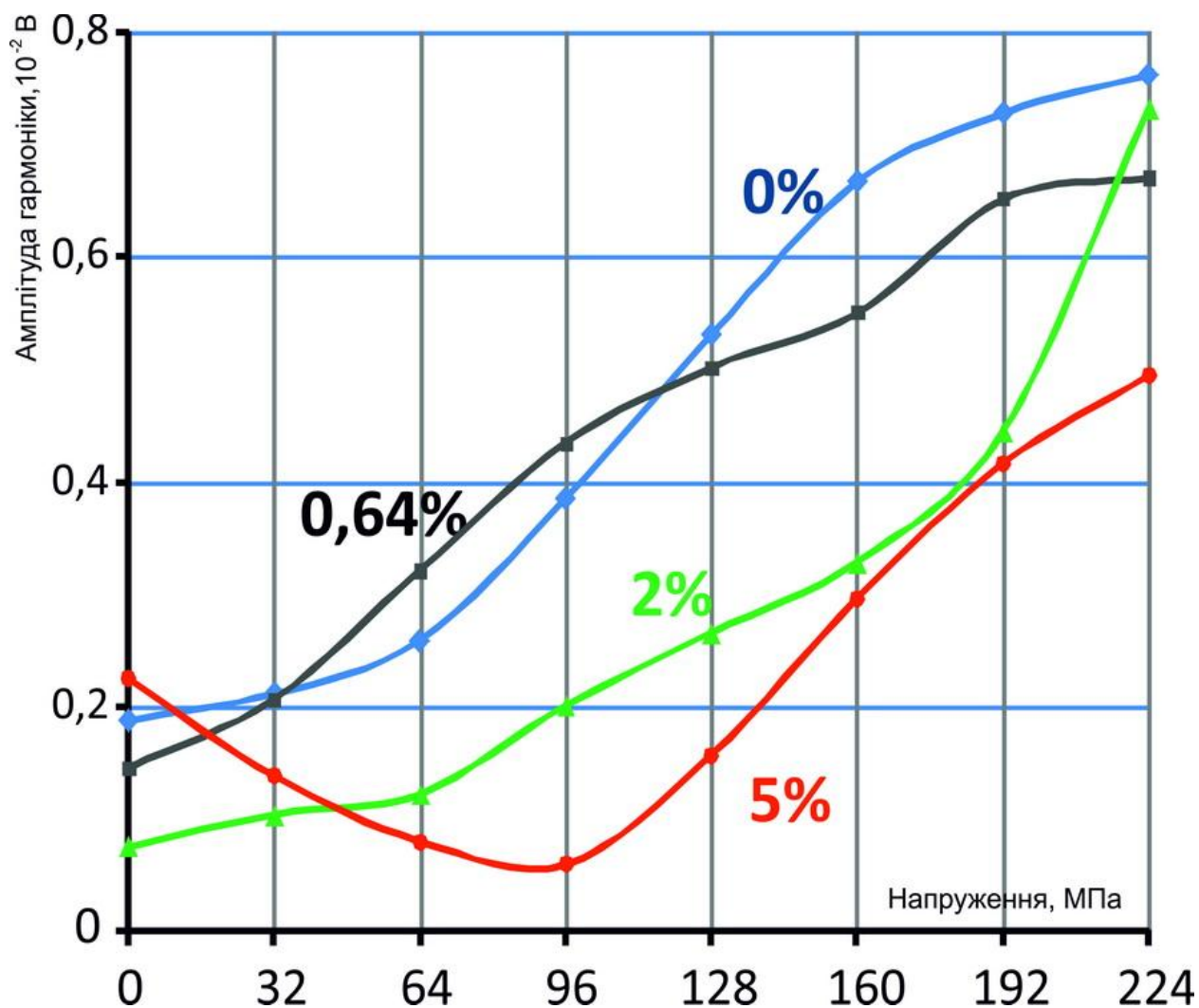


Рис. 3.18 Залежність п'ятої гармоніки А5 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій розтягу

Шоста гармоніка A_6 (рис. 3.19) при відсутності пластичних деформацій має спадаючий характер. При появі пластичних деформацій залежності A_6 має добре виражений характер (крім 2%). Рівні сигналів мають хаотичний характер. Очевидно, що цю залежність використовувати для вирішення задач роботи не має сенсу.

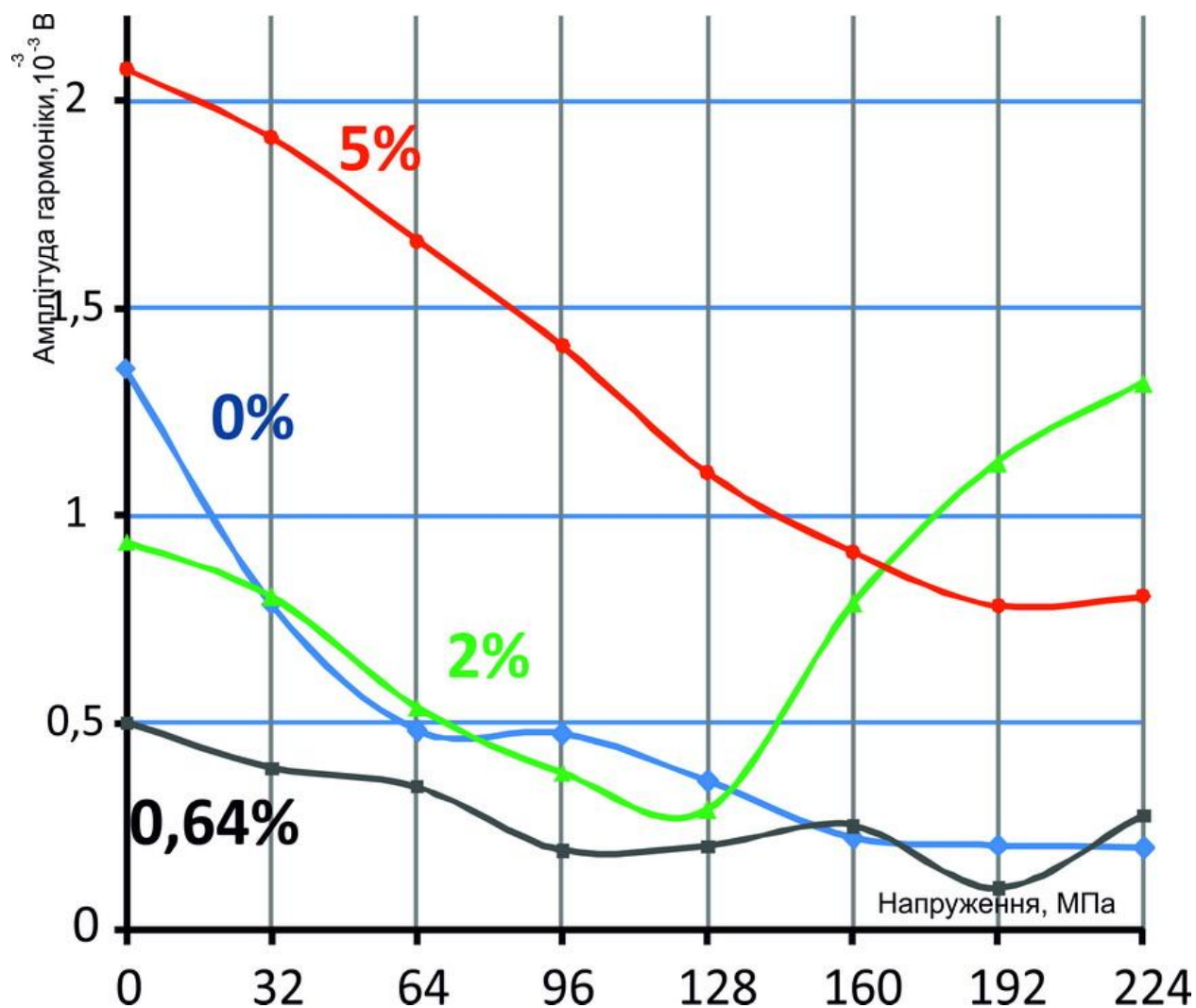


Рис. 3.19 Залежність шостої гармоніки A_6 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій розтягу

Фаза першої гармоніки A1 при відсутності пластичного деформування має спадаючий характер (рис. 3.20). При появі пластичних деформацій 0,64% має сталий характер. При появі 2% та 5% деформацій має зростаючий характер. Ці залежності можна використовувати для визначення залишкових напружень при відомому ступеню пластичного деформування.

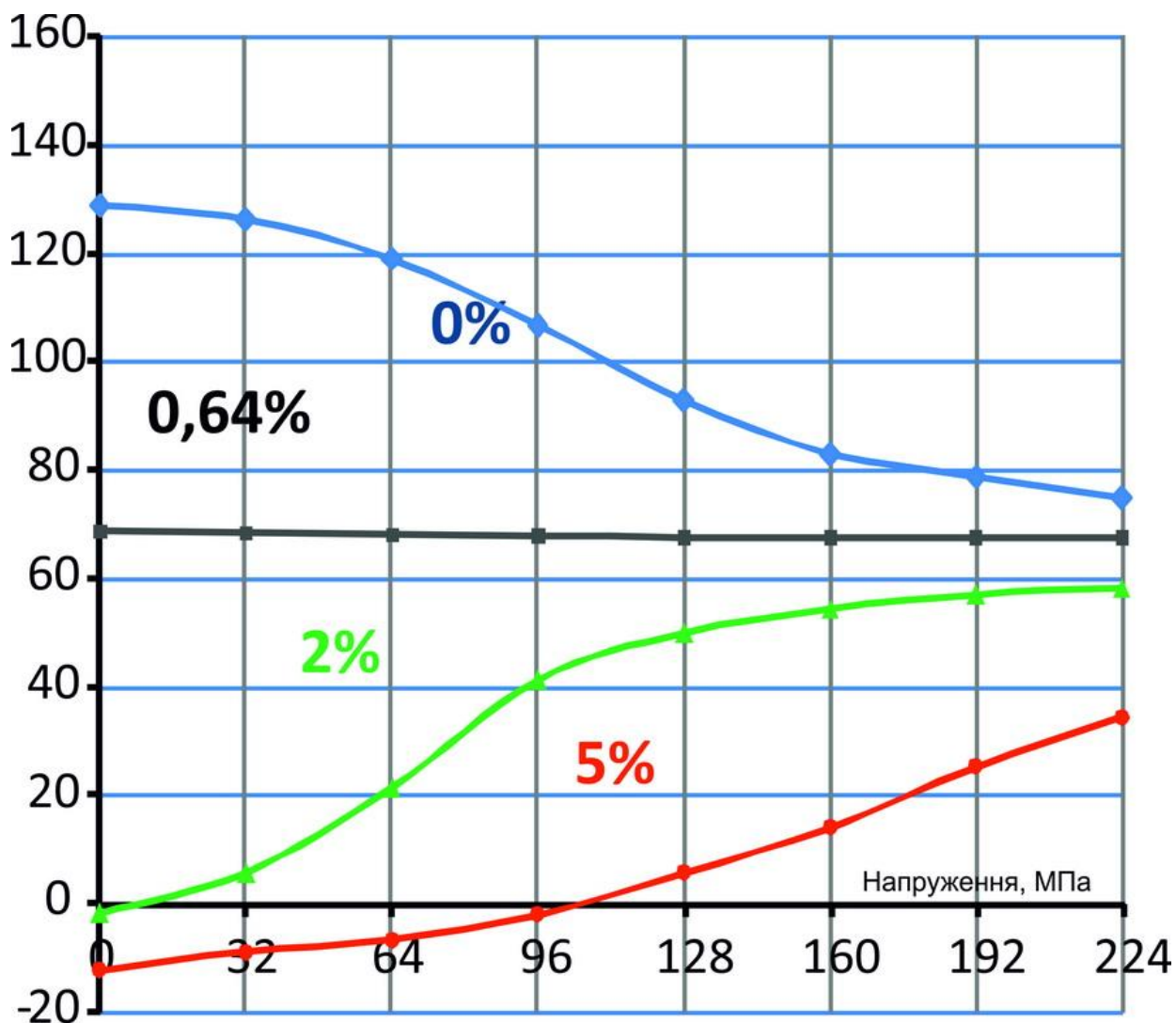


Рис. 3.20 Залежність фази першої гармоніки сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій розтягу

3.4 Експериментальні дослідження сигналів перетворювача параметрів переманічування від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій розтягу

Результати експериментальних досліджень сигналів перетворювача параметрів переманічування від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій розтягу представлені на рис 3.21-3.25.

Параметр H_{max} (рис. 3.21) при відсутності пластичних деформацій має незначний спадаючий характер і не є інформативним. При появі пластичних деформацій залежності H_{max} мають слабо виражений характер, але всі вони не відрізняються по величині сигналу.

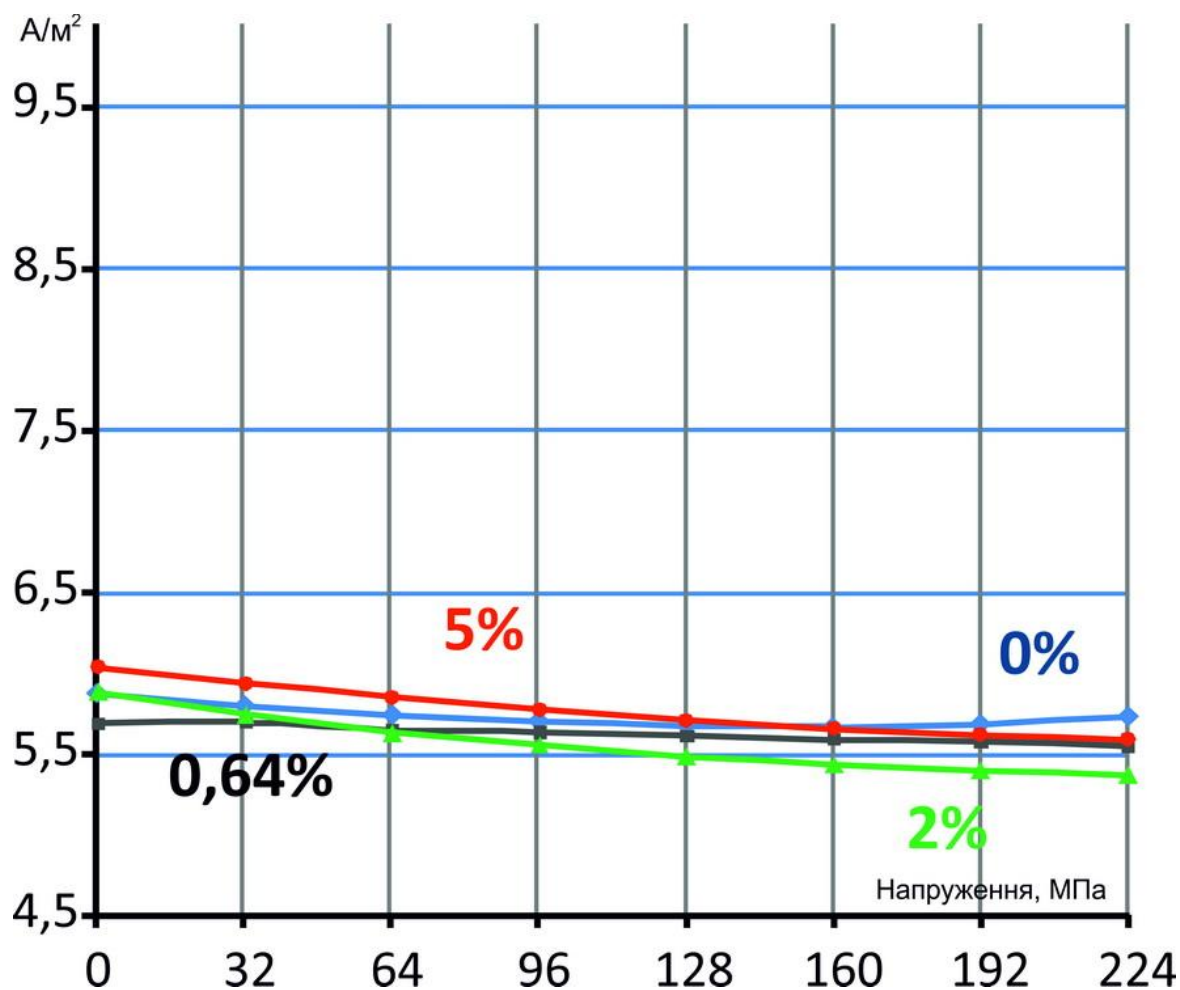


Рис. 3.21 Залежність параметру H_{max} перетворювача параметрів

переманічування від напружень та пластичних деформацій розтягу

По представленим залежностям неможливо визначити діючі напруження та пластичні деформації.

Параметр B_{\max} (рис. 3.22) при відсутності пластичних деформацій має слабо зростаючий характер. При появі пластичних деформацій залежності B_{\max} мають слабо виражений зростаючий характер, але всі вони відрізняються по величині сигналу. По представленим залежностям можливо визначити залишкові пластичні деформації.

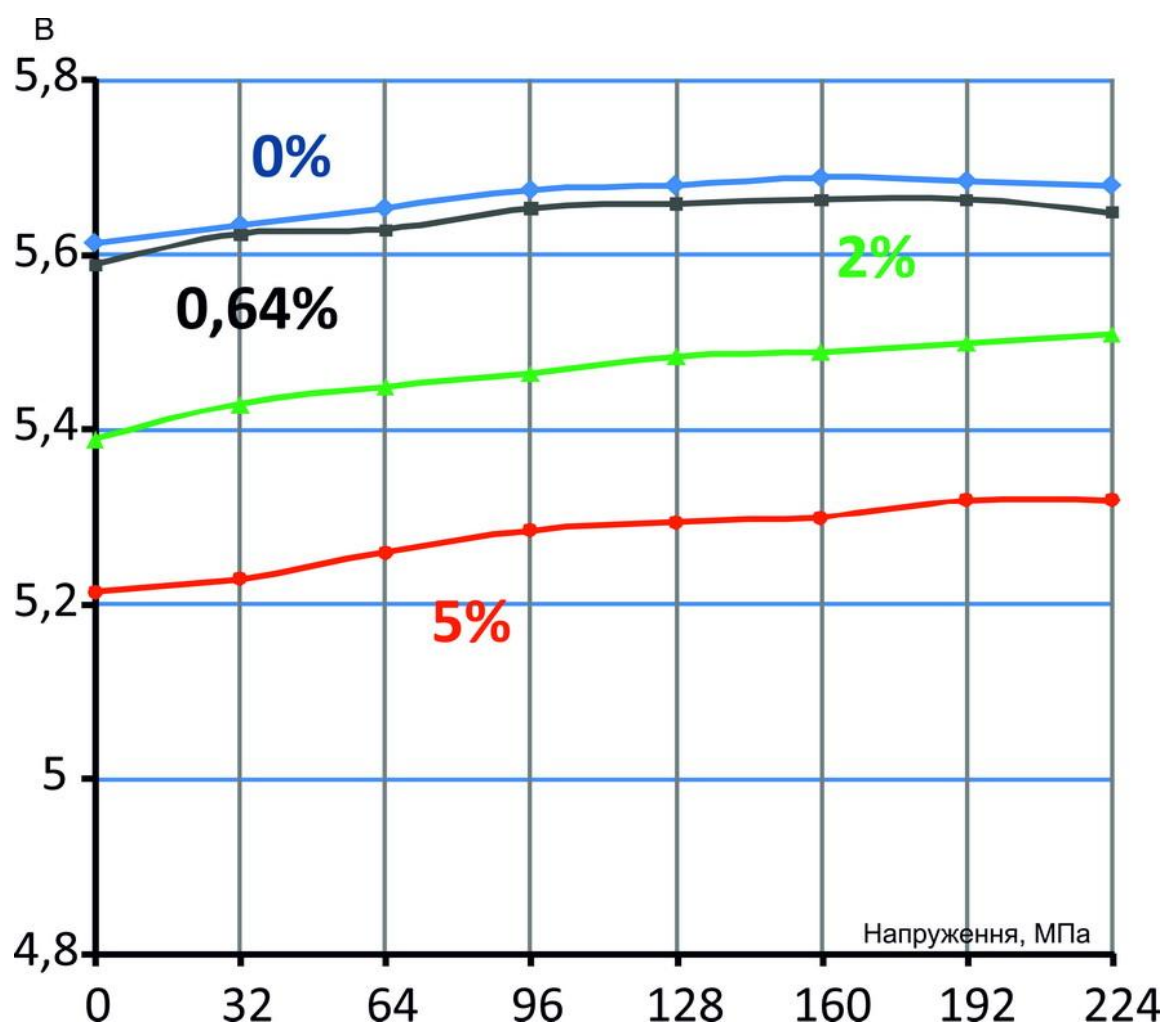


Рис. 3.22 Залежність параметру B_{\max} перетворювача параметрів переміщення від напружень та пластичних деформацій розтягу

Параметр H (рис. 3.23) при відсутності пластичних деформацій має спадаючий характер. При появі пластичних деформацій залежності H мають слабо виражений характер, але всі вони відрізняються по величині сигналу. Нажаль величина сигналу при різних ступенях пластичного деформування є хаотичною. По представленим залежностям неможливо визначити залишкові напруження та пластичні деформації.

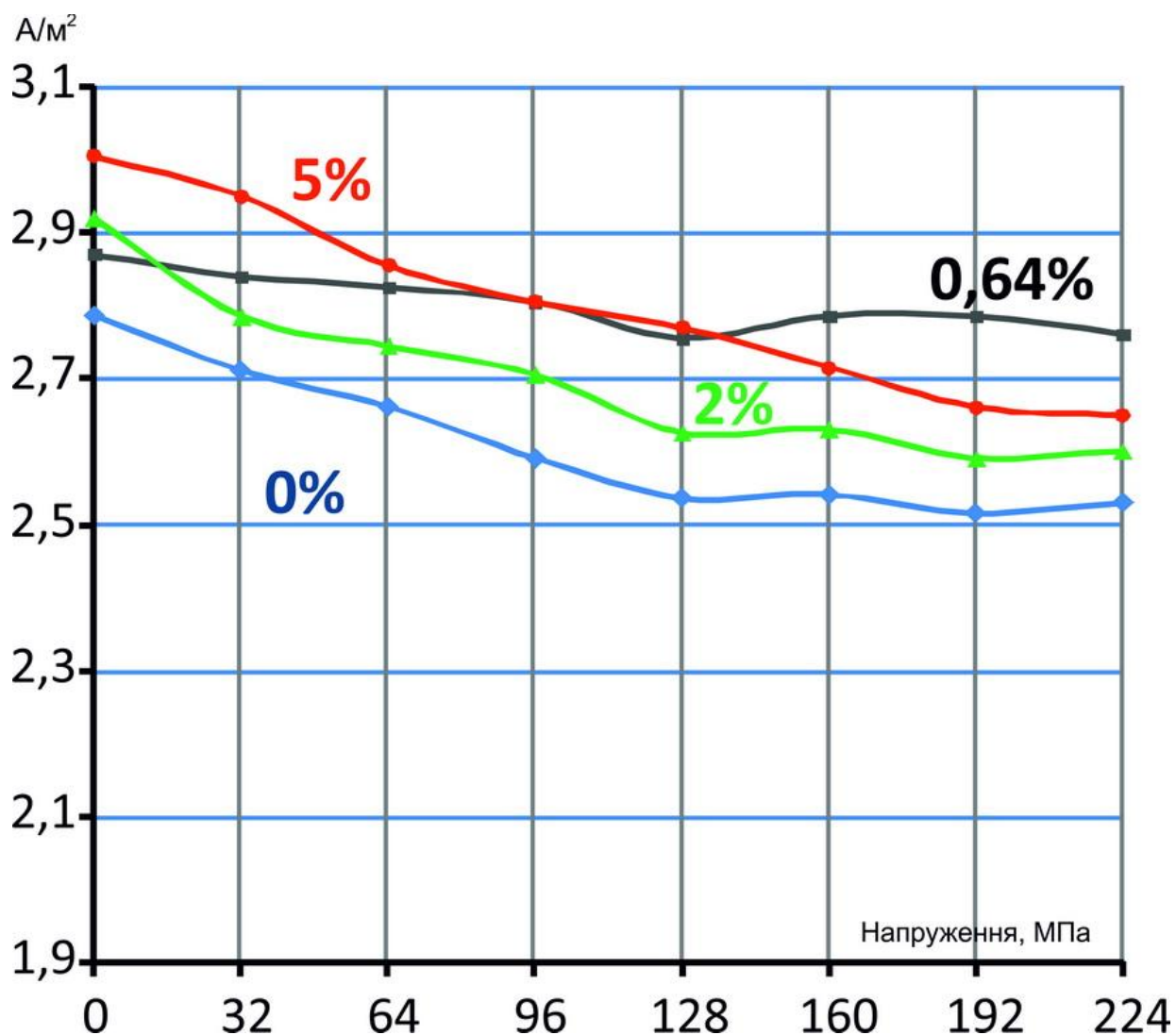


Рис. 3.23 Залежність параметру H перетворювача параметрів переманічування від напружень та пластичних деформацій розтягу

Параметр В (рис. 3.24) при відсутності пластичних деформацій має невиражений характер і не є інформативним. При появі пластичних деформацій залежності В мають слабо виражений характер, але всі вони майже не відрізняються по величині сигналу. По представленим залежностям неможливо визначити залишкові напруження та пластичні деформації.

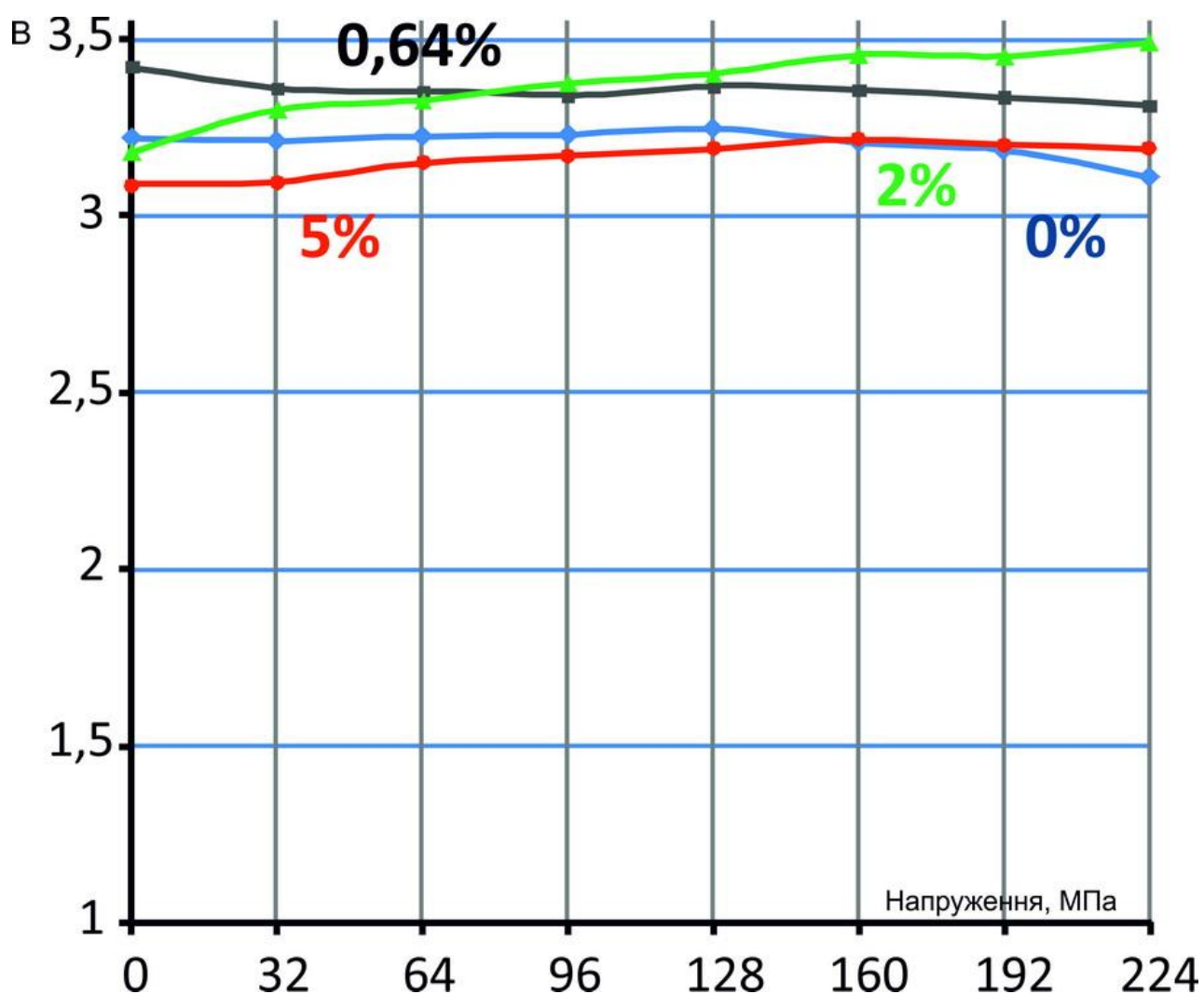


Рис. 3.24 Залежність параметру В перетворювача параметрів перемангнічування від напружень та пластичних деформацій розтягу

Площа (параметр S) петлі магнітного гістерезису (рис. 3.25) при відсутності пластичних деформацій має незначний спадаючий характер. При появі пластичних деформацій залежності S мають спадаючі характери. Всі вони майже не відрізняються по величині сигналу. По представленим залежностям неможливо визначити залишкові напруження та пластичні деформації.

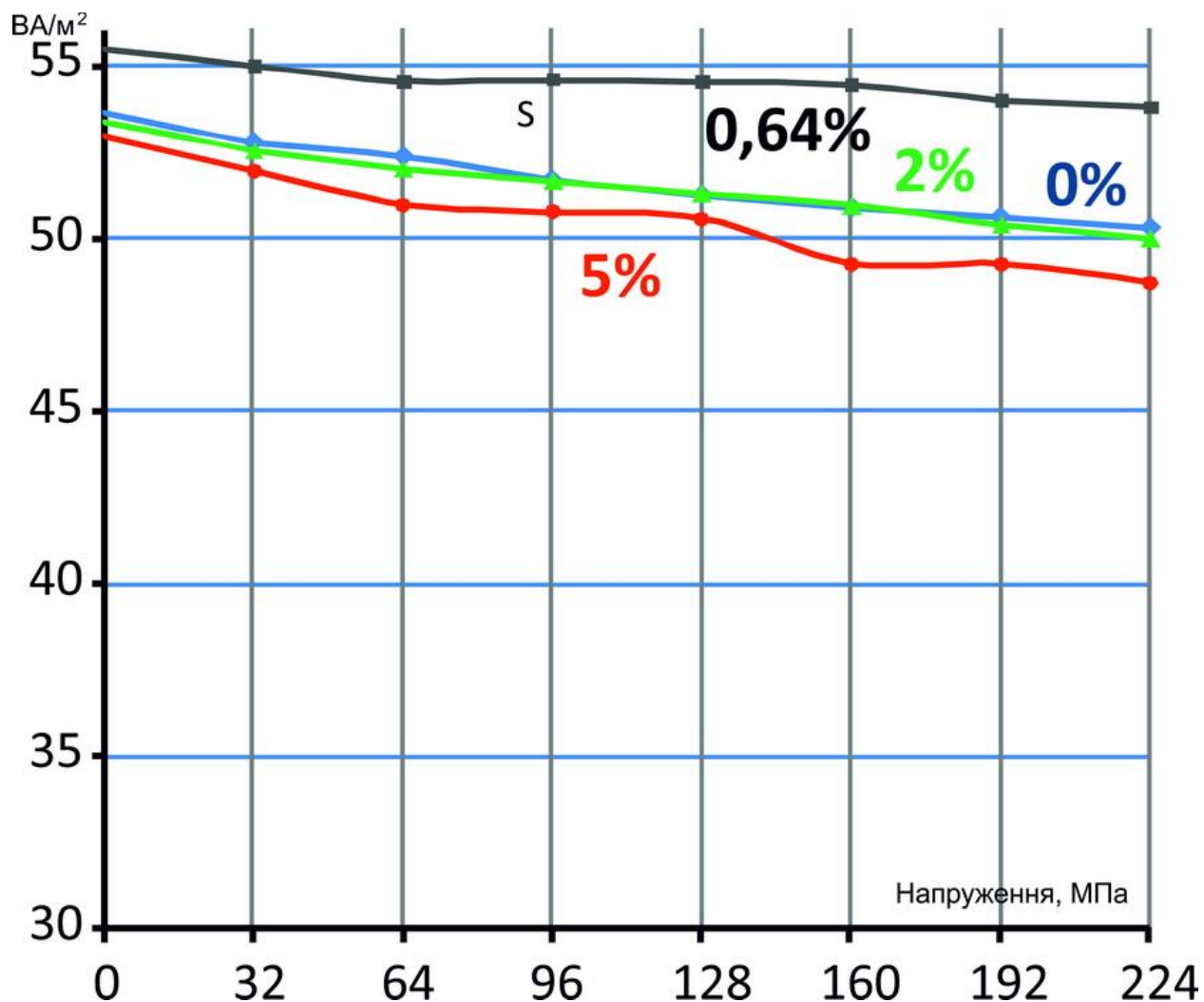


Рис. 3.25 Залежність параметру S перетворювача параметрів перемагнічування від напружень та пластичних деформацій розтягу

3.5 Експериментальні дослідження сигналів перетворювачів магнітоанізотропного та параметрів перемагнічування на моделі 33 –пластині із прорізами

Результати визначень напружень та пластичних деформацій у пластинах із прорізами представлено у таблиці 3.1. Обрахунки отриманих розмірів баз в центральній частині між прорізами проводили по формулам 2.8 та 2.9.

Таблиця 3.1

Ширина пластини, мм	Пластичні деформації, %	Напруження, МПа
93	-0,60	220
107	-0,61	244
126	-0,61	256
165	-0,59	263
205	-0,62	294
245	-0,60	300
287	-0,61	331

Результати експериментальних досліджень сигналів перетворювача параметрів перемагнічування від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій стиснення у пластинах із прорізами разом із даними, що отримані на зразках-балках, представлені на рис. 3.26-3.30. Дані, що отримано на пластинах із прорізами представлено точками, а дані, що отримано на зразках-балках представлено суцільними лініями.

Видно, що перша гармоніка A_1 (рис. 3.26) магнітоанізотропного перетворювача на пластинах із прорізами добре продовжує тенденцію залежності отриманої на зразку-балці.

Третя A_3 (рис. 3.27) та шоста A_6 гармоніки (рис. 3.28) на пластинах із прорізами також добре продовжує тенденцію залежності отриманої на зразку-балці.



Рис. 3.26 Залежність першої гармоніки A_1 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення (зразок-балка та пластини із прорізами)

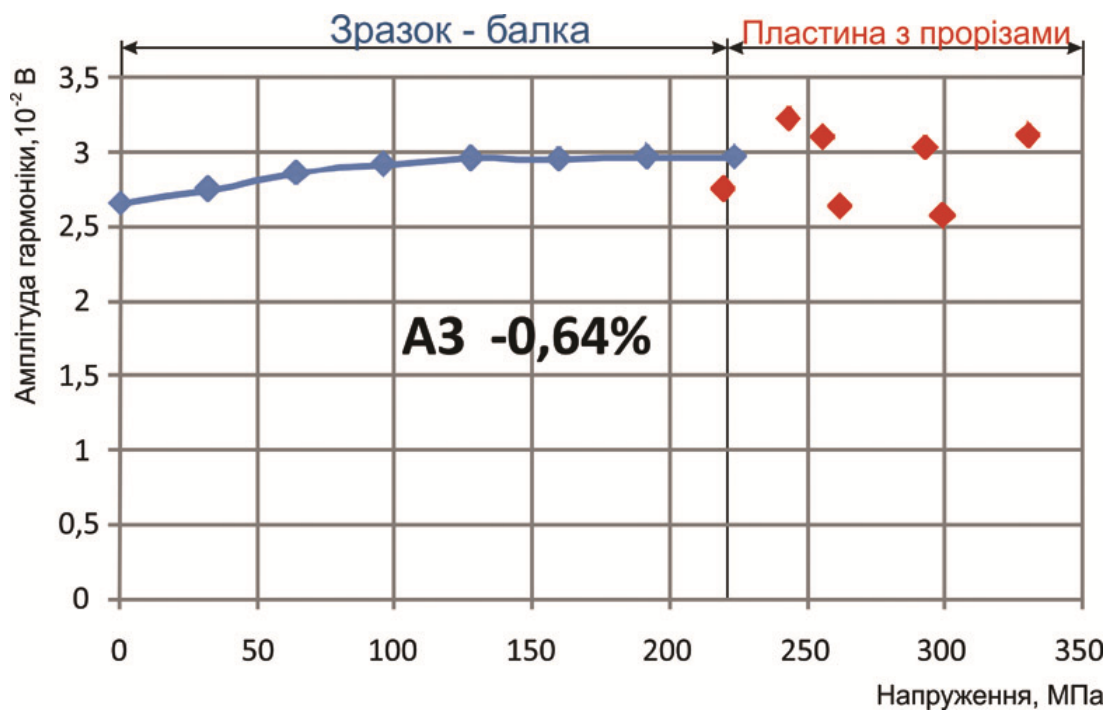


Рис. 3.27 Залежність першої гармоніки A_3 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення (зразок- балка та пластини із прорізами)

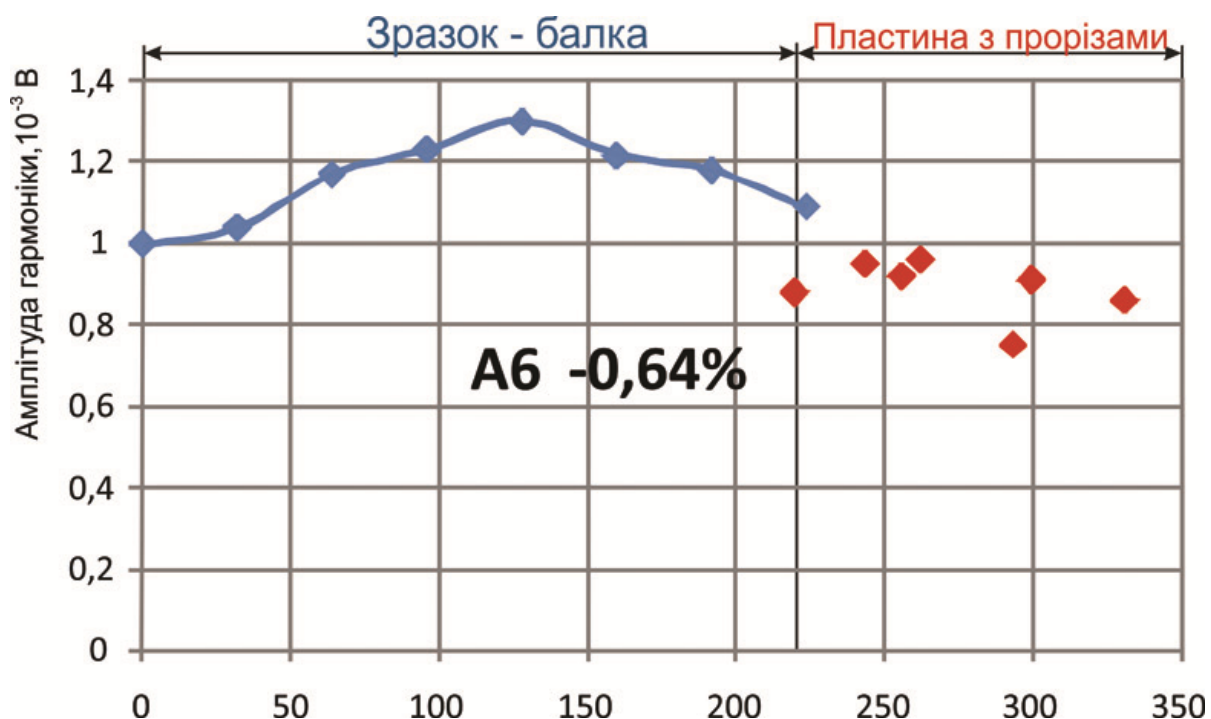


Рис. 3.28 Залежність шостої гармоніки A6 сигналу магнітоанізотропного перетворювача від напружень та пластичних деформацій стиснення (зразок-балка та пластини із прорізами)

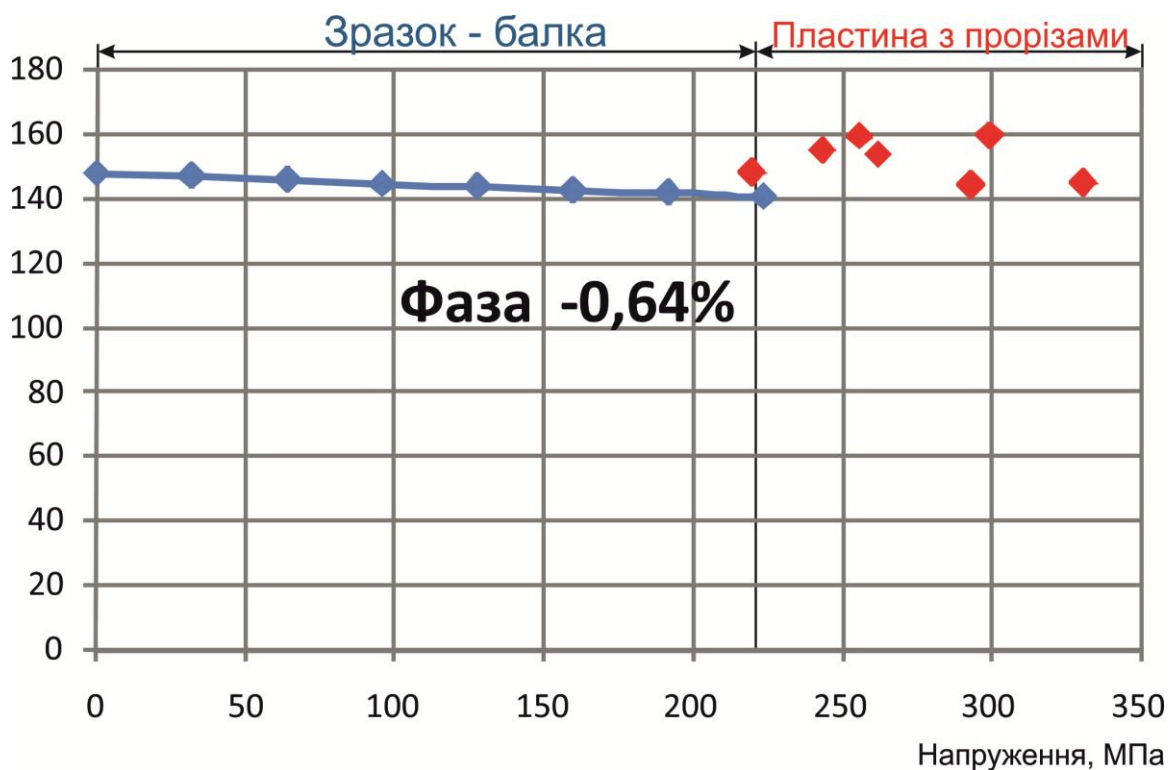


Рис. 3.29 Залежність фази першої гармоніки перетворювача МА від напружень та пластичних деформацій стиснення (зразок-балка та пластини із прорізами)

Фаза першої гармоніки (рис. 3.29) на пластині із прорізами в цілому продовжує тенденції на зразку-балці хоча має трохи більші значення.

Параметр H_{\max} (рис. 3.30) на пластинах із прорізами також добре продовжує тенденцію залежності отриманої на зразку-балці.

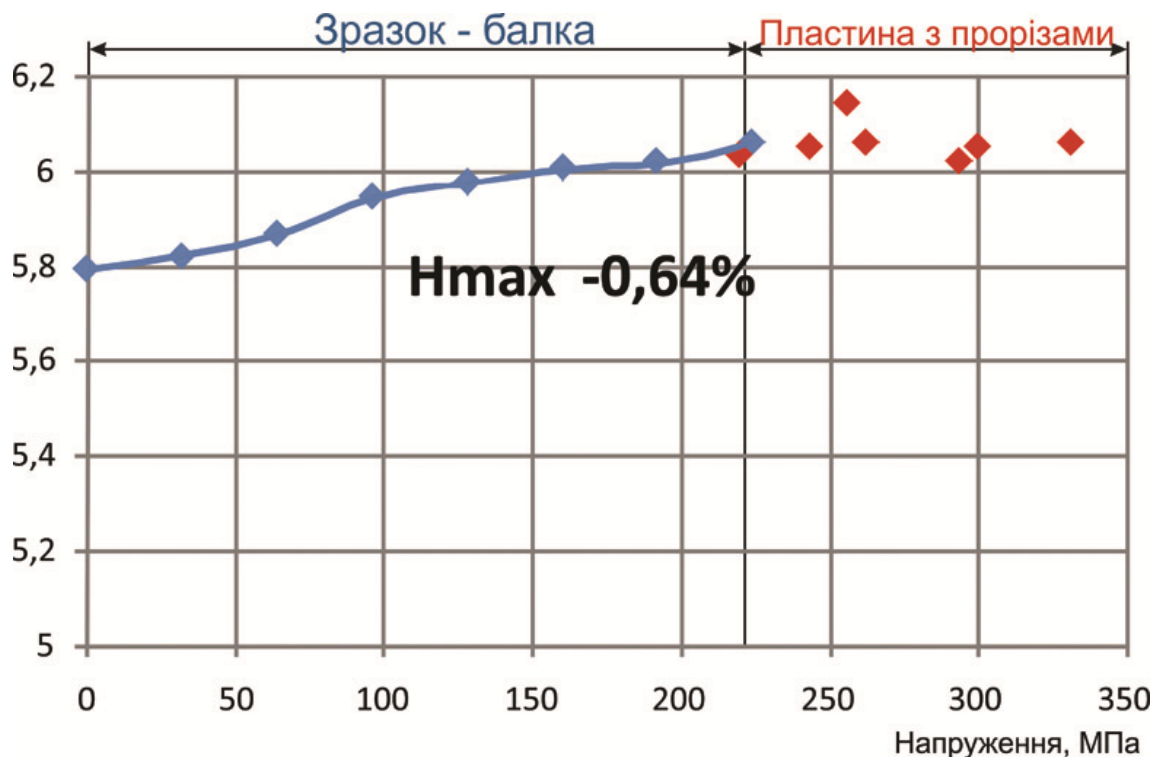


Рис. 3.30 Залежність параметру H_{\max} перетворювача параметрів перемагнічування від напружень та пластичних деформацій стиснення (зразок-балка та пластини із прорізами)

Параметр B (рис. 3.31) на пластинах із прорізами також в цілому продовжує тенденцію залежності отриманої на зразку-балці, але із більшим розкидом.

Площа петлі магнітного гістерезису (параметр S) (рис. 3.32) на пластинах із прорізами також в цілому продовжує тенденцію залежності отриманої на зразку-балці, але із ще більшим розкидом.

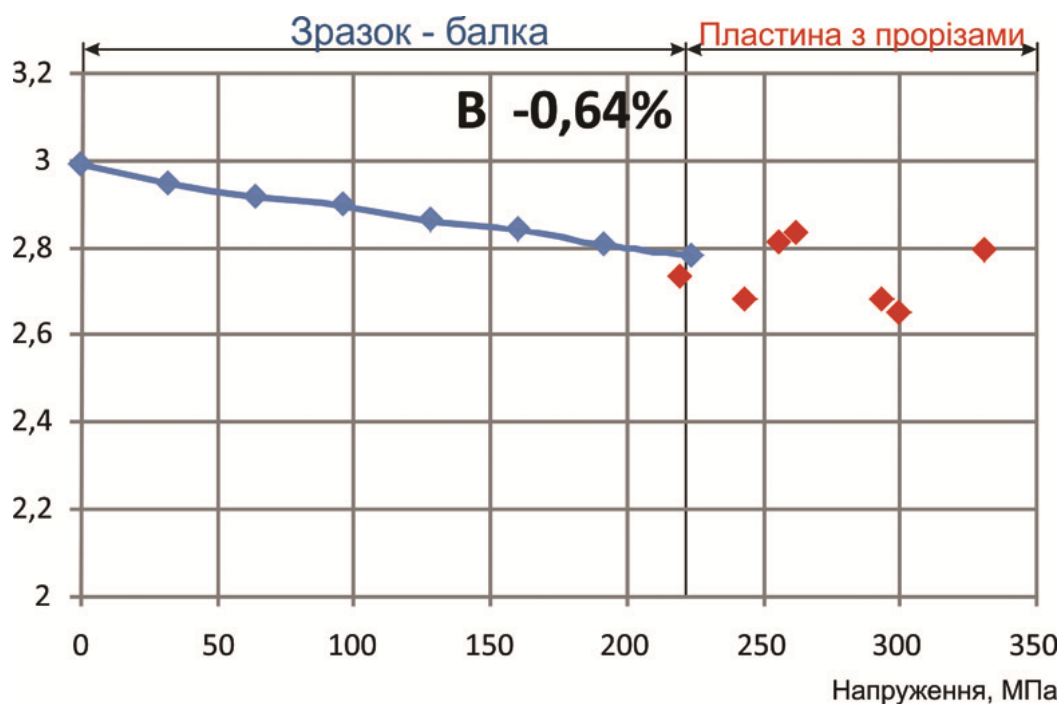


Рис. 3.31 Залежність параметру B перетворювача параметрів переманічування від напружень та пластичних деформацій стиснення (зразок-балка та пластини із прорізами)

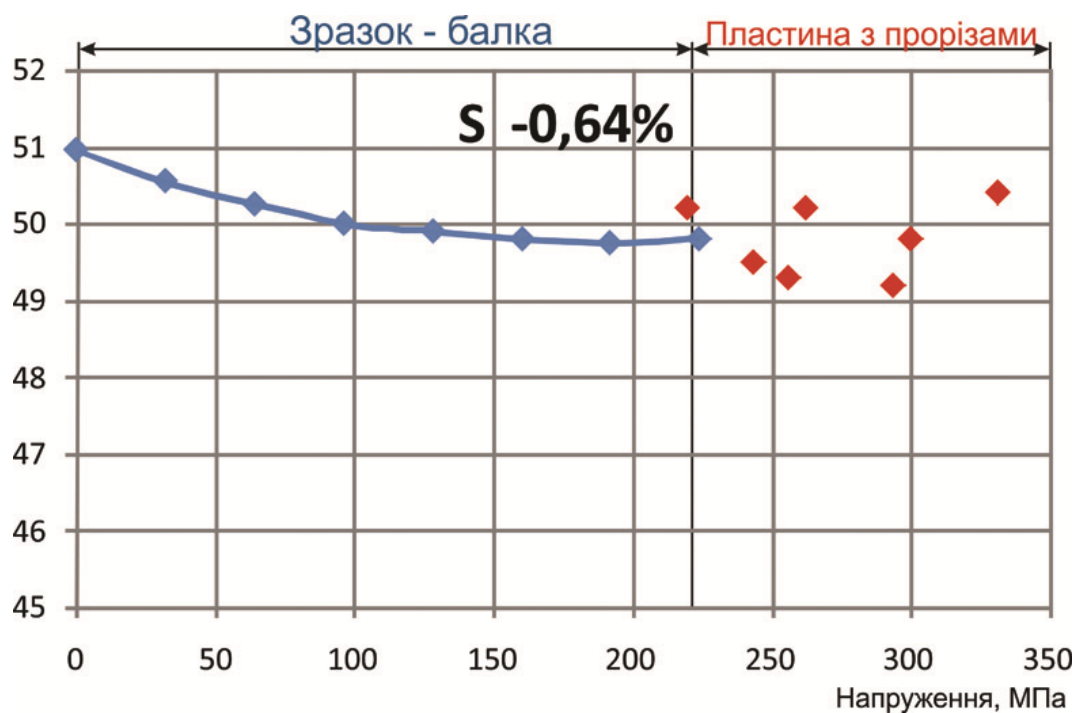


Рис. 3.32 Залежність параметру S перетворювача параметрів переманічування від напружень та пластичних деформацій стиснення (зразок-балка та пластини із прорізами)

3.6 Експериментальні дослідження сигналів магнітоанізотропного та параметрів перемагнічування перетворювачів від напружень та деформацій у зварному шві

Дослідження проводили шляхом наплавки валка металу на пластину 200x100мм сталі 09Г2С товщиною 4 мм. При наплавці використовували апарат для механізованого зварювання в середовищі вуглекислого газу дротом 1,2 мм, пальник закріпили на фрезерному верстаті із числовим програмним керуванням. Зварювальний струм складав 112 А, напруга 21 В, швидкість зварювання 300 мм/хв., швидкість подачі дроту 154 м/год. Ширина валка складала 10 мм.

Ширина зони напружень розтягу, виміряної із зворотної сторони методом МА, складала 42мм (вп=21мм), і це співпало із визначенням по кольорам мінливості відповідно до [14] (рис. 3.33, 3.34).

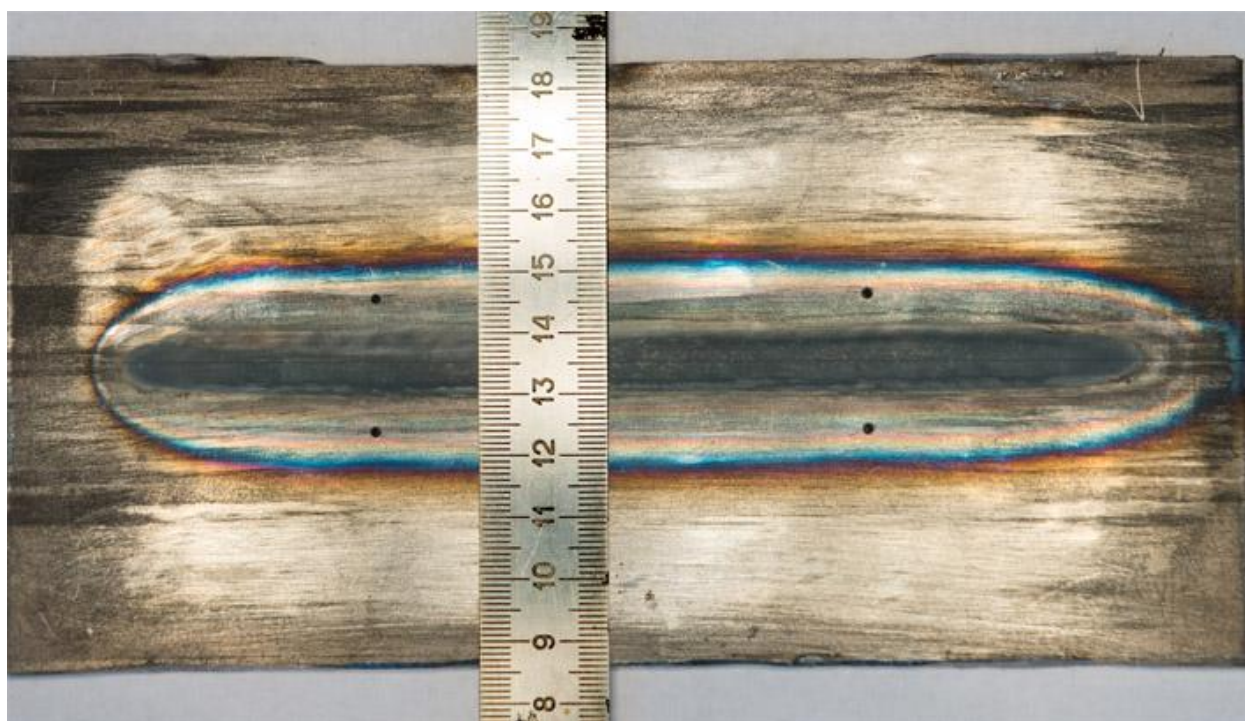


Рис. 3.33 Вигляд зворотної сторони шва із кольорами мінливості



Рис. 3.34 Вигляд зварного шва із кольорами мінливості (лицьова сторона)

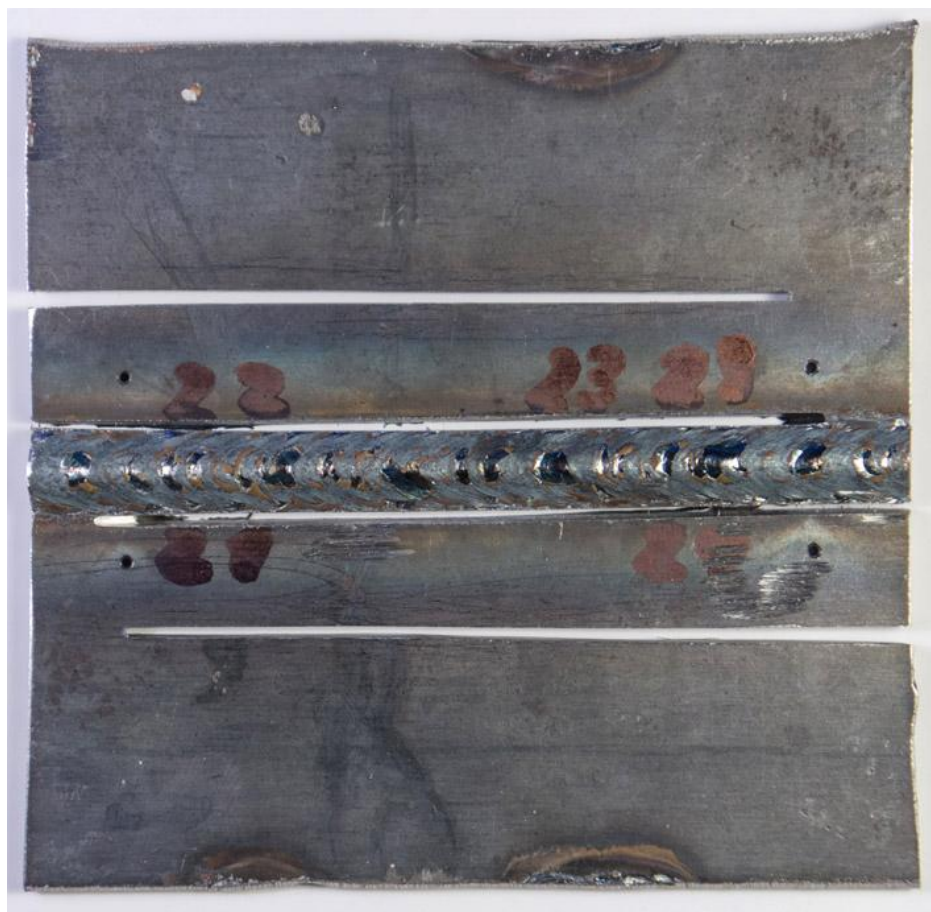


Рис. 3.35 Вигляд зварного шва після вивільнення баз шляхом вирізання.

Розрахунки пластичних деформацій та напружень проведено по формулам 2.8 та 2.9. Вимірювання деформацій та напружень по двох базах (80 мм) в пластичній зоні 33 показало пластичні деформації 0,22-0,24% та напруження 337,5 Мпа (рис. 3.35).

Розподіл першої гармоніки A_1 на зварному шві має класичний характер (рис.3.36). Зменшення сигналу на зварному шві викликано появою опуклості зі зворотної сторони (де проводили вимірювання) та литою структурою шва.

Розподіл третьої гармоніки A_3 на зварному шві має класичний характер (рис.3.37). Зменшення сигналу на зварному шві викликано появою опуклості зі зворотної сторони (де проводили вимірювання) та литою структурою шва.

Розподіл шостої гармоніки A_6 має збільшення сигналу із максимумом на зварному шві (рис.3.38). Нажаль, ми не маємо градувального графіку для таких деформацій. В цілому розподіл нагадує епіюру поздовжніх напружень.

Розподіл параметру N_{max} має збільшення сигналу із максимумом на зварному шві (рис.3.39), що показує збільшення пластичних деформацій стиснення при наближенні до осі шва (рис. 3.9).

Розподіл параметру B має зменшення сигналу із мінімумом на зварному шві (рис. 3.40), що показує також збільшення пластичних деформацій при наближенні до осі шва (рис. 3.12).

Розподіл параметру S має характер зменшення в пластичній зоні із яскраво вираженим піком (максимумом) на осі зварного шва (рис.3.41). Характер в цілому (крім литої структури шва) відповідає отриманим раніше залежностям (рис. 3.13).

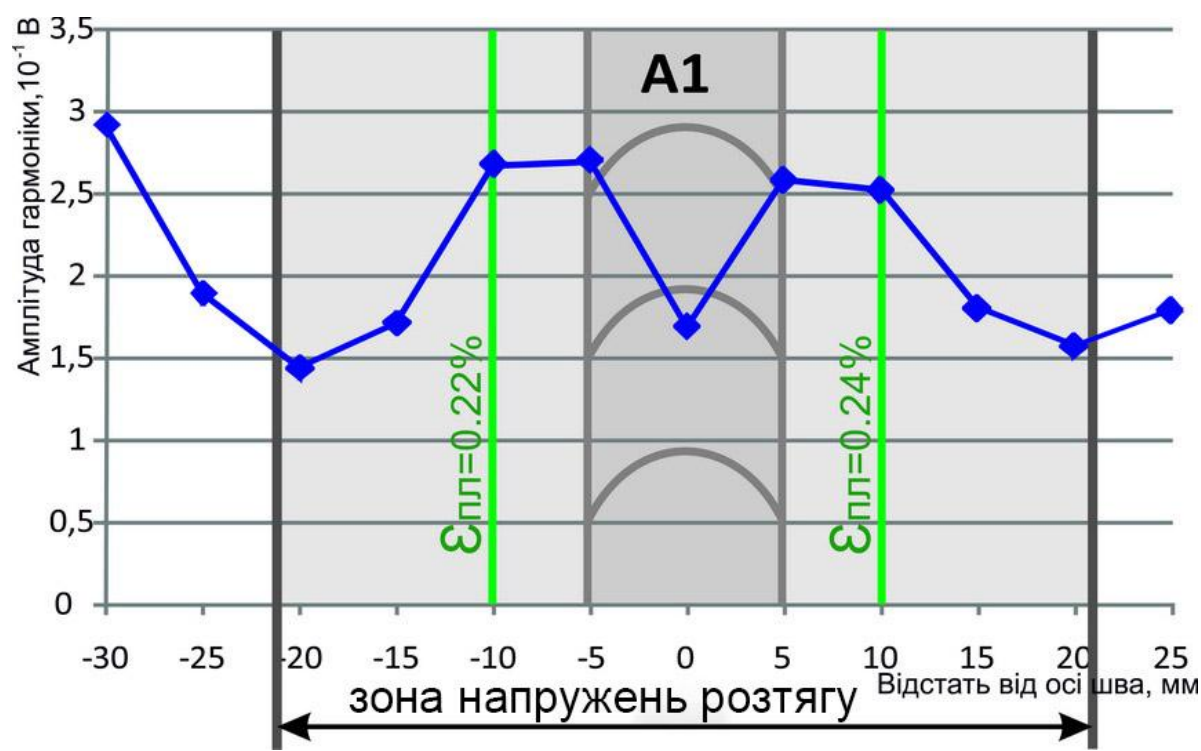


Рис. 3.36 Залежність першої гармоніки A1 сигналу магнітоанізотропного перетворювача на зварному шві у залежності від відстані від осі шва

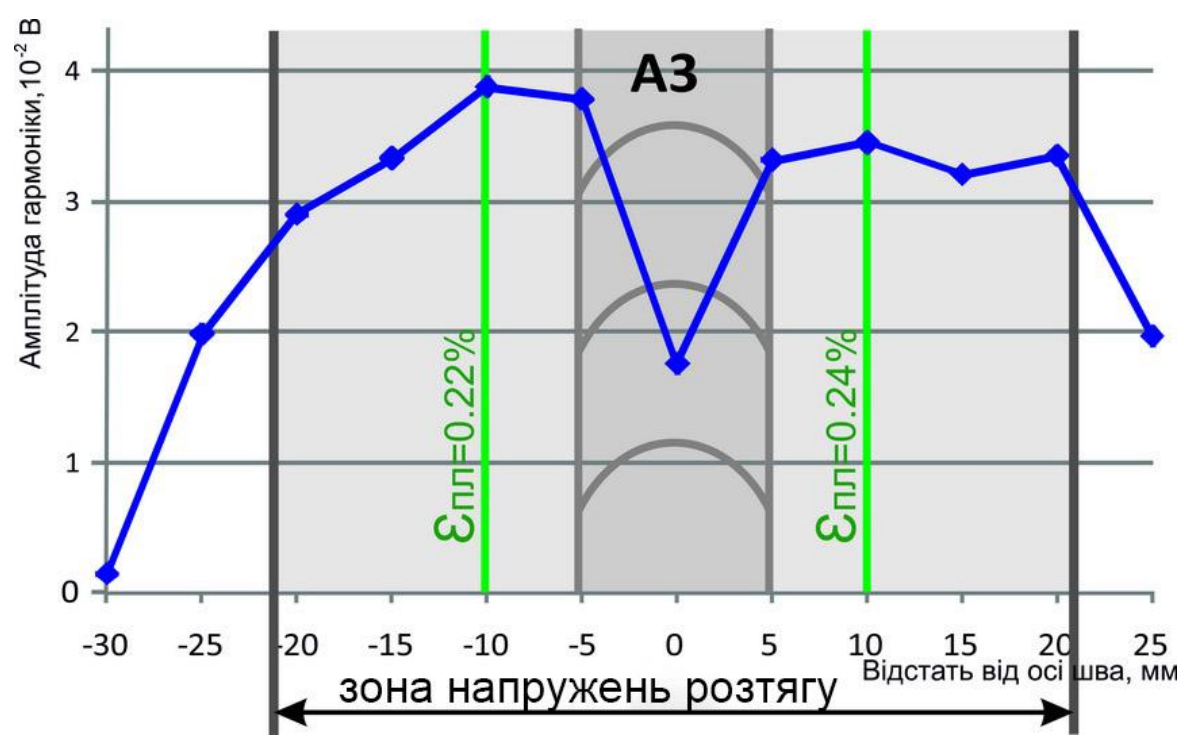


Рис. 3.37 Залежність третьої гармоніки A3 сигналу магнітоанізотропного перетворювача на зварному шві у залежності від відстані від осі шва

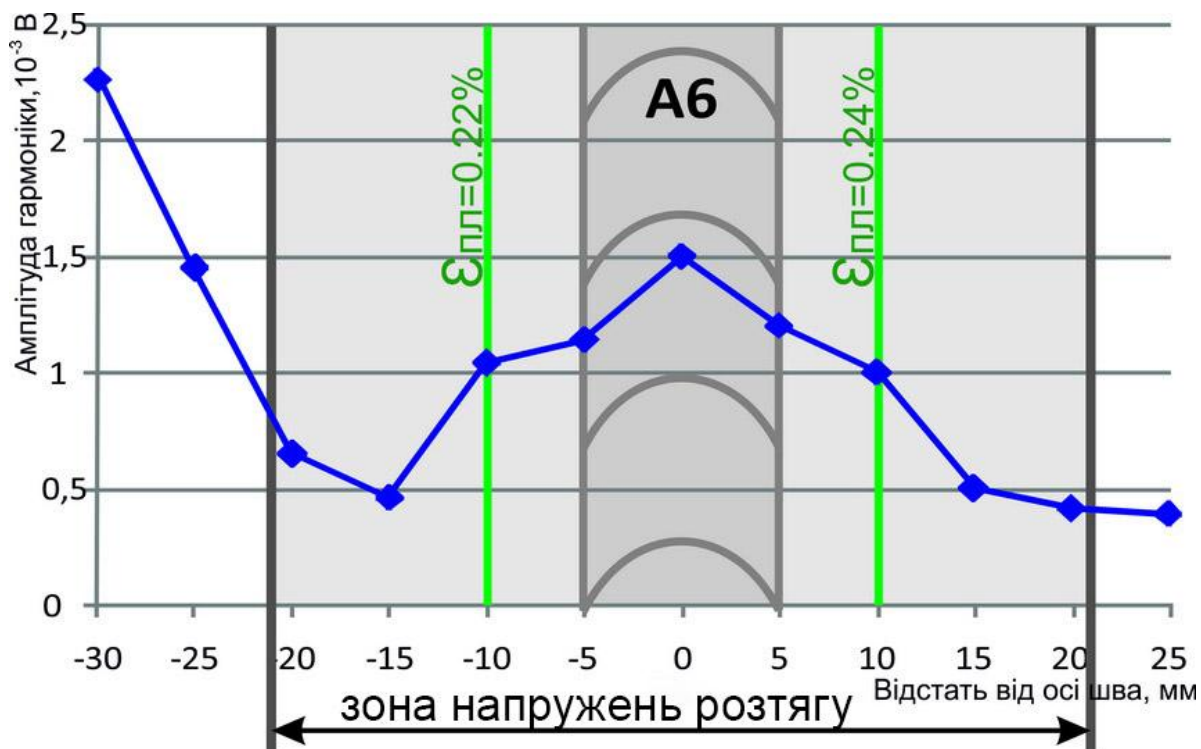


Рис. 3.38 Залежність шостої гармоніки A6 сигналу магнітоанізотропного перетворювача на зварному шві у залежності від відстані від осі шва

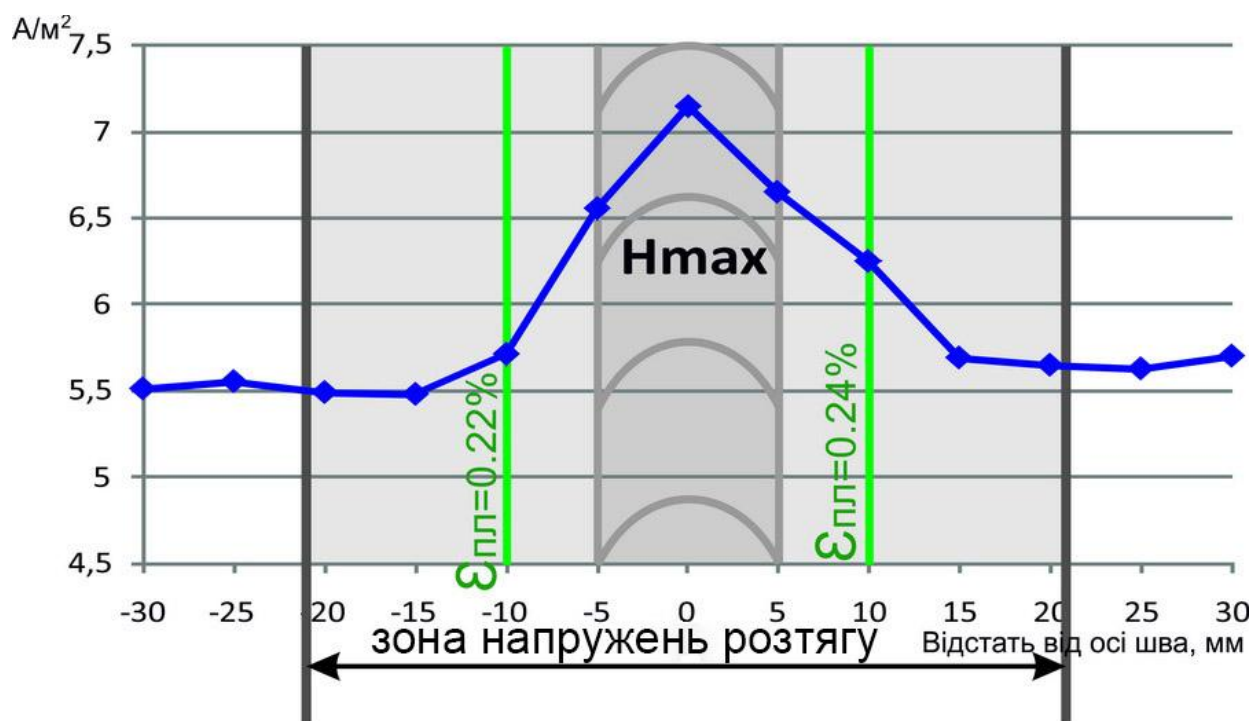


Рис. 3.39 Залежність параметру Hmax перетворювача параметрів перемagnetування на зварному шві у залежності від відстані від осі шва



Рис. 3.40 Залежність параметру В перетворювача параметрів перемангнічування на зварному шві у залежності від відстані від осі шва

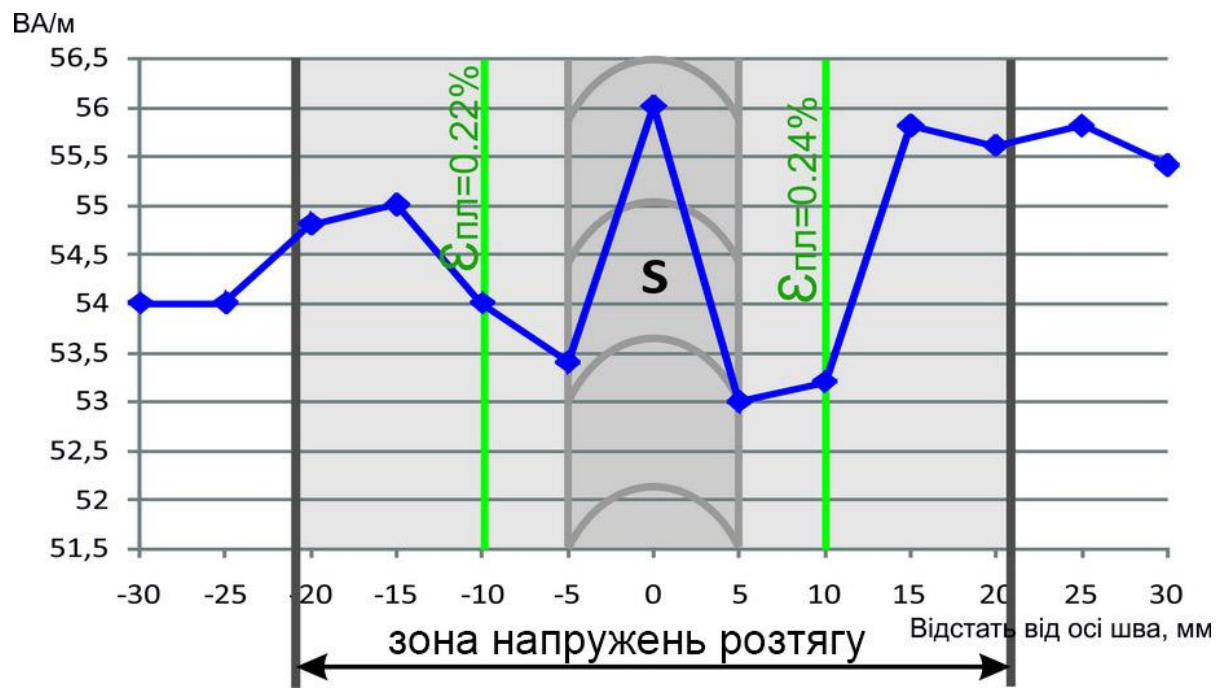


Рис. 3.41 Залежність параметру S перетворювача параметрів перемангнічування на зварному шві у залежності від відстані від осі шва

Були розраховані пластичні деформації в зоні напружень розтягу зварного шва використовуючи залежності параметрів В та Нmax, що отримані на зразках-балках (рис.3.42-3.46).

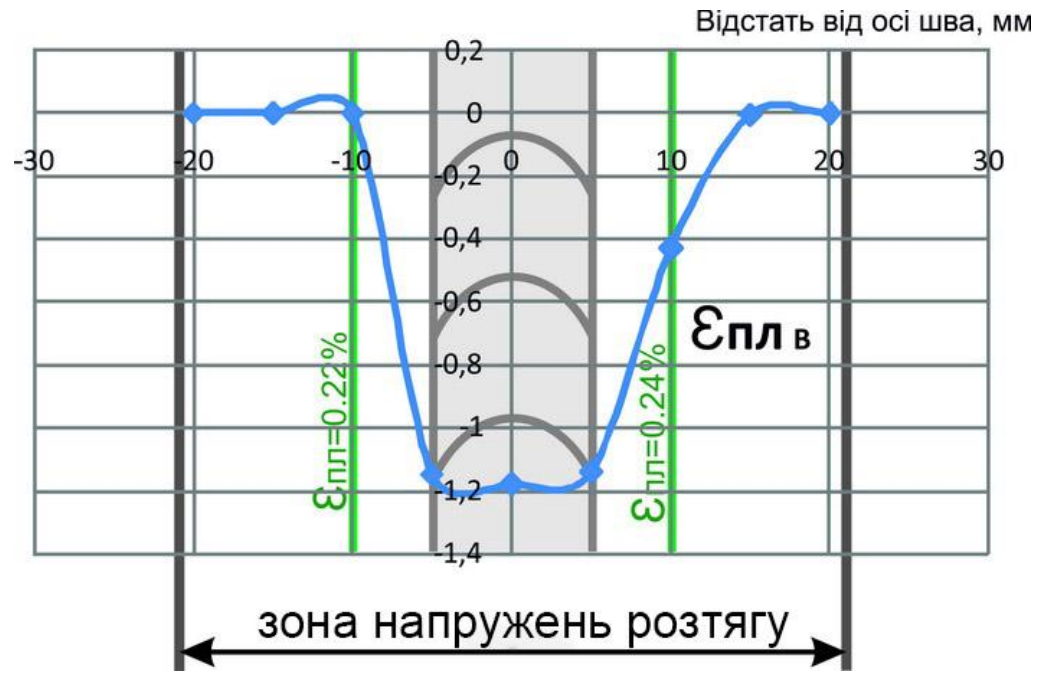


Рис. 3.42 Результати обрахунків пластичних деформацій стиснення по параметру В

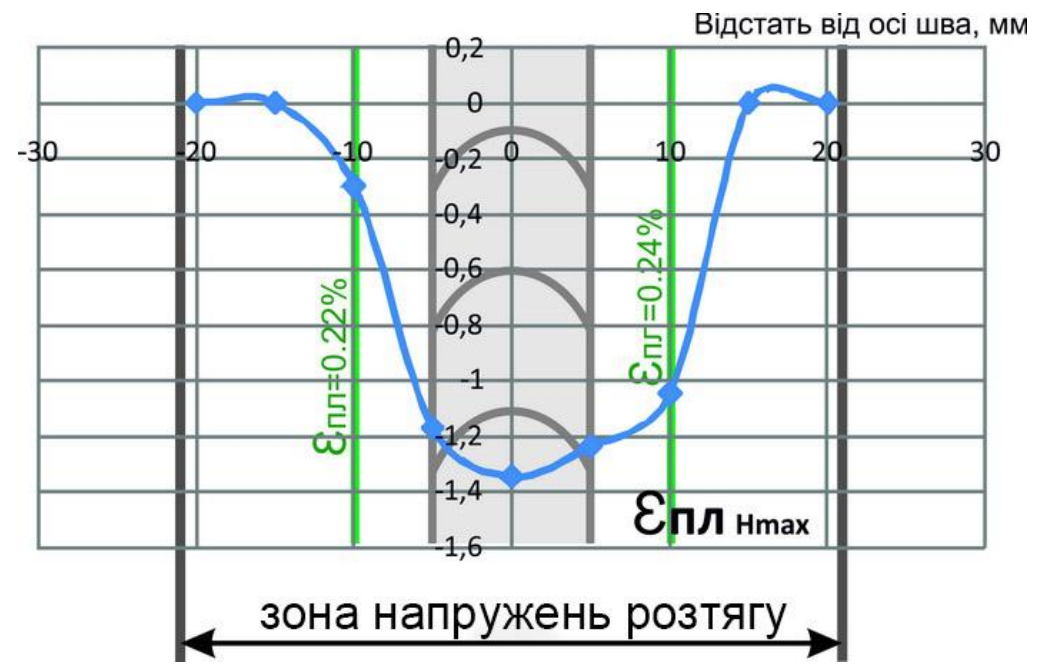


Рис. 3.43 Результати обрахунків пластичних деформацій стиснення по параметру Нmax

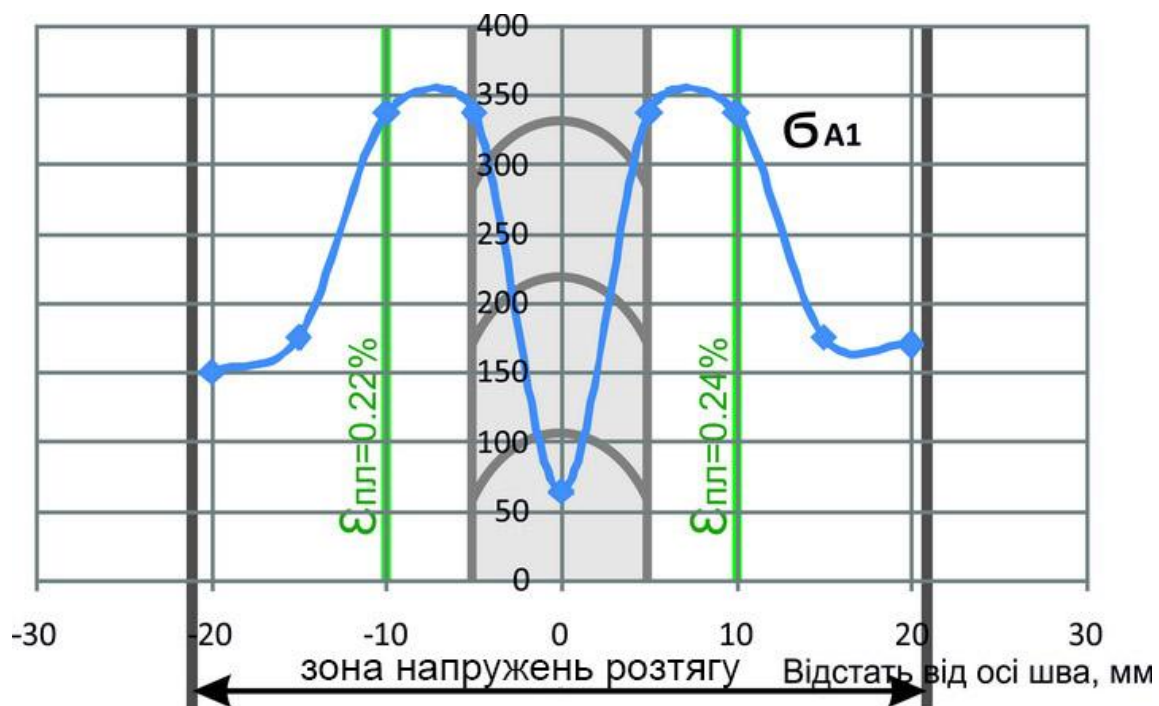


Рис. 3.44 Результати обрахунків залишкових напружень розтягу по параметру

A1

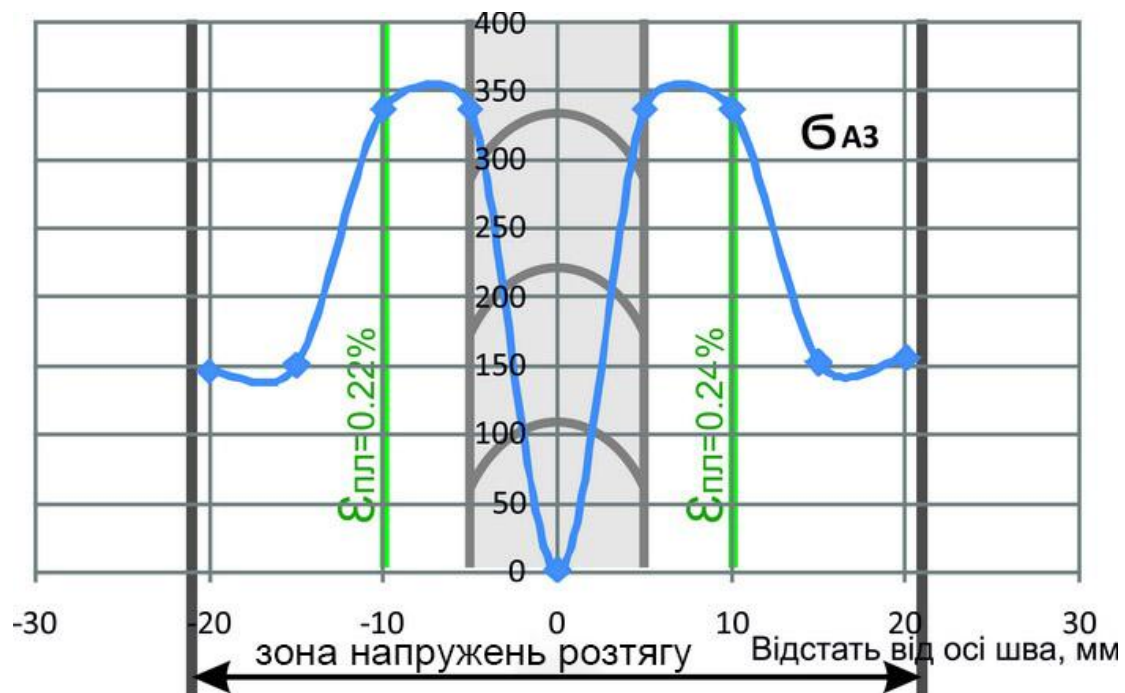


Рис. 3.45 Результати обрахунків залишкових напружень розтягу по параметру

A3

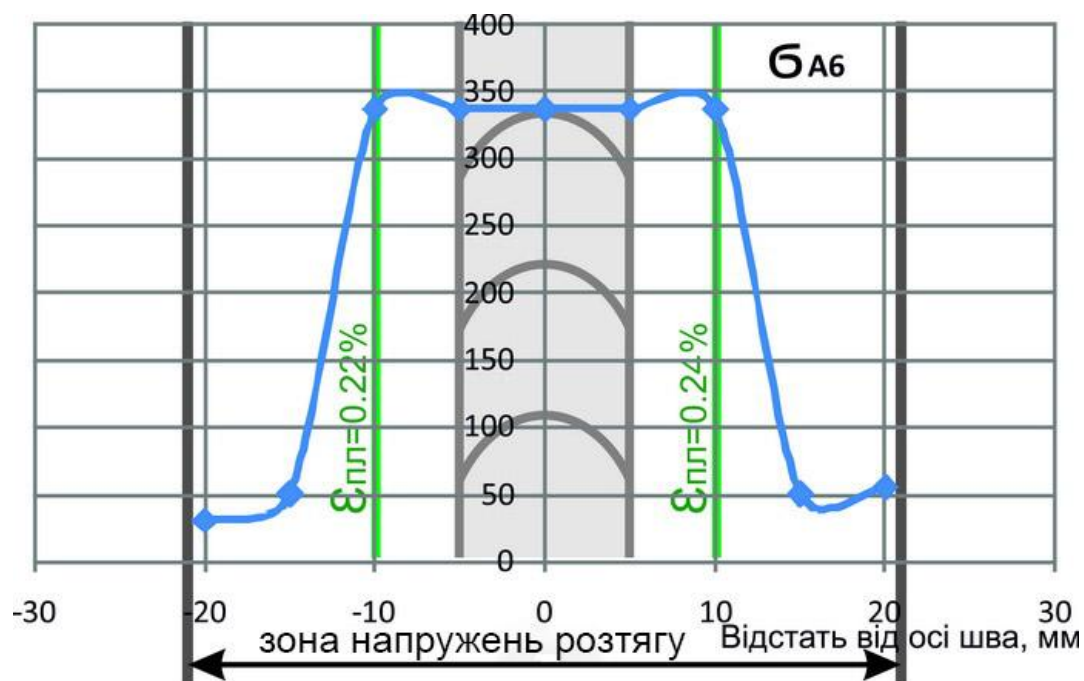


Рис. 3.46 Результати обрахунків залишкових напружень розтягу по параметру А6

Розподіл залишкових пластичних деформацій зварного шва, розрахованих по параметрам В та Нmax, має традиційний характер. Ширина зони пластичного деформування є меншою ніж ширина зони напружень розтягу. Це відповідає класичним уявленням та може додатково зменшуватись від усереднення вимірів параметрів на базі вимірювання перетворювача (5мм). Найбільші значення пластичних деформацій на основному металі сягають 1,2%, що також відповідає традиційним уявленням [14].

Розподіл напружень розтягу по параметрам А1, А3 та А6 також має традиційний вигляд. Розподіли напружень, розраховані по параметрам А1 та А3, мають мінімум по осі шва. Це можна пояснити литою структурою, що має інші магнітні властивості від основного металу, та опуклістю зворотної сторони зварного шва (де проводились вимірювання). Ширина зони напружень розтягу, розрахована по параметрам А1, А3 та А6, є меншою від визначеної приладом MESTR-411. Це можна пояснити усередненням вимірів параметрів на базі вимірювання перетворювача (26 мм).

Висновки до розділу 3

А) Отримано експериментальні дані сигналів магнітоанізотропного перетворювача та перетворювача параметрів перемагнічування від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій стиснення.

В) Для визначення ступеню пластичного деформування стисненням у пластичній зоні зварних з'єднань електромагнітним методом доцільно застосовувати параметри: B (половину перетину петлі гістерезису по осі індукції) та H_{max} (половину максимальної ширини петлі гістерезису по осі напруженості магнітного поля). Для визначення напружень у пластичній зоні зварних з'єднань електромагнітним методом доцільно застосовувати параметри: амплітуди першої A_1 , третьої A_3 та шостої A_6 гармонік.

С) Отримано експериментальні дані сигналів магнітоанізотропного перетворювача та перетворювача параметрів перемагнічування від одновісних напружень розтягу та пластичних деформацій розтягу.

Д) Для визначення ступеню пластичного деформування у ділянках із пластичними деформаціями розтягу доцільно застосовувати параметр B_{max} (половину максимальної висоти петлі магнітного гістерезису по осі індукції). Для визначення напружень у ділянках із пластичними деформаціями розтягу доцільно застосовувати фазу першої гармоніки A_1 сигналу магнітоанізотропного перетворювача.

Е) Дослідження сигналів перетворювачів магнітоанізотропного та параметрів перемагнічування на моделі зварних з'єднань – пластині із прорізами показало прийнятність використання запропонованих підходів до визначення напружень та деформацій у пластичних зонах зварних з'єднань.

Ф) Дослідження сигналів перетворювачів магнітоанізотропного та параметрів перемагнічування на зварному шві показало прийнятність використання запропонованих підходів до визначення напружень та деформацій у пластичних зонах зварних з'єднань.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРО-МАГНІТНИМ МЕТОДОМ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

4.1 Розробка комбінованого перетворювача.

Для визначення напружень та пластичних деформацій необхідно визначати наступні параметри: B , H_{\max} , амплітуди першої A_1 , третьої A_3 та шостої A_6 гармонік, фазу першої гармоніки A_1 , B_{\max} . Отже прилад для реалізації запропонованого підходу повинен одночасно (почергово) визначати вказані параметри, а перетворювач повинен мати властивості магнітоанізотропного та параметрів перемагнічування перетворювачів. Для вирішення цих завдань запропоновано комбінований перетворювач у двох варіантах.

В першому варіанті, в перетворювачі намагнічуючий електромагніт доповнено обмотками намагнічування та вимірювання по методу ПП (рис. 4.1). Для сканування конструкції по методу МА використовується напрям 45° від намагнічуючого електромагніта, а для сканування по методу ПП використовується напрям намагнічуючого електромагніта.

В другому варіанті, магнітоанізотропний перетворювач доповнено незалежним осердям 2 із обмоткою намагнічування 1 по методу ПП (рис.4.2). Таке виконання дозволяє не змінювати напрямку сканування ЗК по методам МА та ПП. Однак додаткове осердя 2 збільшує базу вимірювання перетворювача. На технічне рішення такого комбінованого перетворювача отримано патент на корисну модель [10]. Крім того, перетворювач МА виконано у вигляді 4 незалежних осердь 3,4,5,6 із універсальними обмотками (можуть використовуватись як для намагнічування, так і для вимірювання). Наприклад, для МА обмотки 3 та 4 (включаються узгоджено) є обмотками намагнічування, а 5,6— обмотками вимірювання (включаються

узгоджено). Для методу ПП обмотки 3 та 5 (як 6 та 4) включаються узгоджено і являють собою вимірювальні електромагніти.

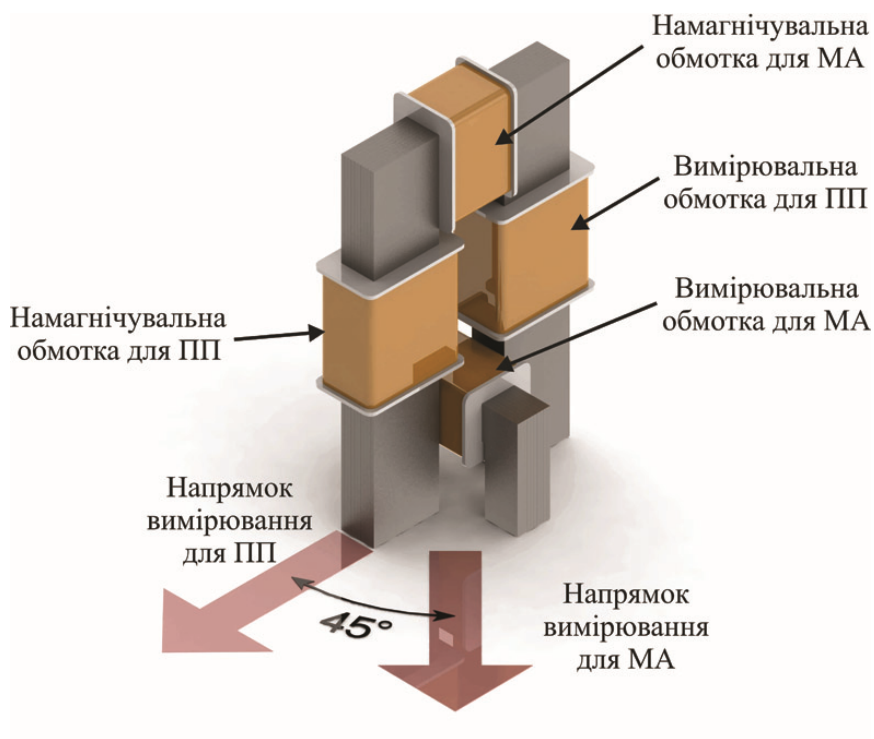


Рис. 4.1 Новий комбінований перетворювач варіант 1

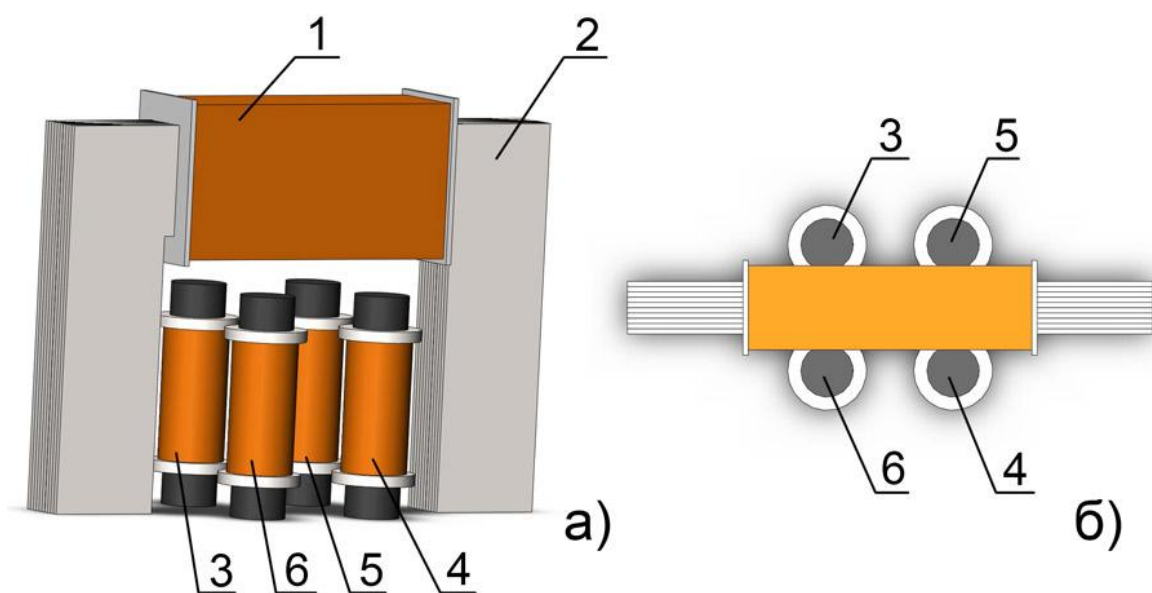


Рис. 4.2 Новий комбінований перетворювач варіант 2 : а - фронтальний вигляд, б – вигляд зверху

4.2 Розробка приладу для визначення напружено-деформованого стану зварних конструкцій електромагнітним методом MESTER - 501

4.2.1 Склад приладу MESTER– 501

Визначення напружено-деформованого стану ЗК передбачає визначення сигналів методів МА та ПП, проведення гармонічного аналізу сигналу по методу МА, розрахунку пластичних деформацій та напружень по раніше отриманим залежностям. Тому доцільно будувати новий прилад навколо промислового комп'ютеру, який може взяти на себе завдання аналізу сигналів і розрахунку деформацій та напружень.

Ми вибрали промисловий комп'ютер - WAFER-8522 Embedded Fanless Solutions.

Схема функціональна приладу MESTER -501 наведена на рис.4.3

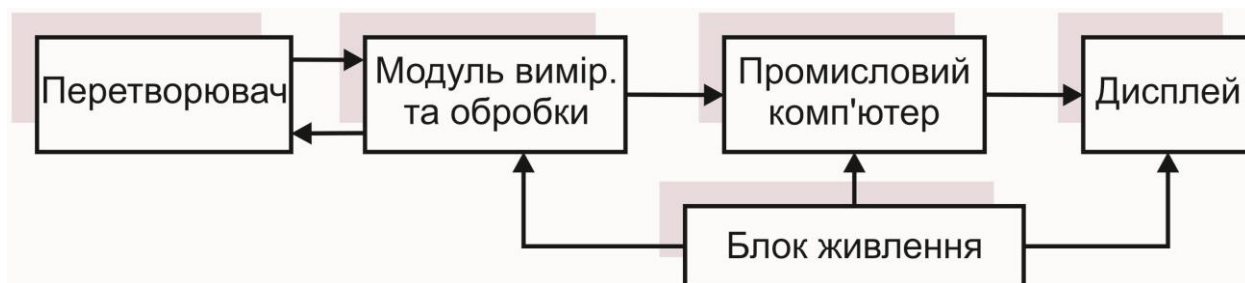


Рис. 4.3 Функціональна схема приладу (MESTER – 501)

Прилад MESTER -501 складається з таких блоків :

1. Комбінованого перетворювача.
2. Модуля вимірювання та обробки сигналів .
3. Промислового комп'ютеру (ECW-281B/8522/1GB).
4. Монітору (LILLIPUT 869GL-80NP/C)
5. Акумуляторного блоку живлення.

Таблиця 4.1 Технічні характеристики комп'ютера ECW-281B/8522/1GB [130]

Процесорна плата	
Модель процесорної плати	WAFER-8522-1GZ
Процесор	Intel Celeron M ULV 1 ГГц (без кеш-пам'яті)
Чипсет	Intel 852GM + ICH4
Оперативна пам'ять	1 x 200-pin 266 МГц DDR SDRAM SO-DIMM, до 1Гб
Об'єм встановленої оперативної пам'яті	1 Гб
Мережевий контролер (Ethernet)	2 x Realtek RTL8110SC GbE
Звуковий контролер	AC'97
Відеоконтролер	
VGA контролер	Вмонтований в чипсет
Інтерфейс	VGA
Роз'єм	DB-15
Порт	
USB 2.0	4
RS-232/422/485	1
RS-232	5
LAN (RJ-45)	2
Звукові (Audio)	1 x Line Out
Відділи для накопичувачів	
Жорсткий диск (HDD)	Можливість установки 1 x 2.5" IDE HDD

Флеш пам'ять (SSD)	1 x Compact Flash слот (внутрішній)
Живлення пристрою	
Напруга живлення	12 В (постійний струм)
Потужність, Вт	27
Блок живлення	Зовнішній адаптер, 60 Вт
Умови експлуатації	
Температура експлуатації	0 ~ 50 С
Матеріал корпусу	Алюміній
Система охолодження	Пасивна (Безвентиляторна)
Розміри (Ш x В x Г), мм	132 x 229 x 64
Вага (нетто / брутто)	2.1кг / 3.9 кг

Монітор: LILLIPUT 869GL-80NP/C

Таблиця 4.2 Технічні характеристики монітора [131]

Розміри панелі	8" TFT LCD
Роздільна здатність	800x480, до 1920 x 1080 пікселів
Яскравість	250 кд /м2
Контрастність	300:1
Кут огляду	130 ° /120 ° (H/V)
Вхідна напруга	12 В постійного струму
Споживча потужність	$\leq 8W$
Аудіо вихід	$\leq 1W$
Розмір	211x136x31
Вага	560 грам

4.2.2 Робота приладу MESTER – 501

Модуль вимірювання та обробки сигналів виробляє намагнічуючий сигнал для обмотки намагнічування перетворювача. Сигнал з вимірювальної обмотки перетворювача поступає на модуль вимірювання та обробки сигналів, де піддається фільтруванню, підсиленню, синхронному детектуванню, аналого-цифровому перетворенню. Після цього отримані дані передаються до промислового комп'ютера. Останній проводить гармонічний аналіз, визначає параметри петлі магнітного гістерезису та розраховує деформації та напруження.

Функціональна схема модуля обробки та вимірювання даних наведена на рис. 4.4.

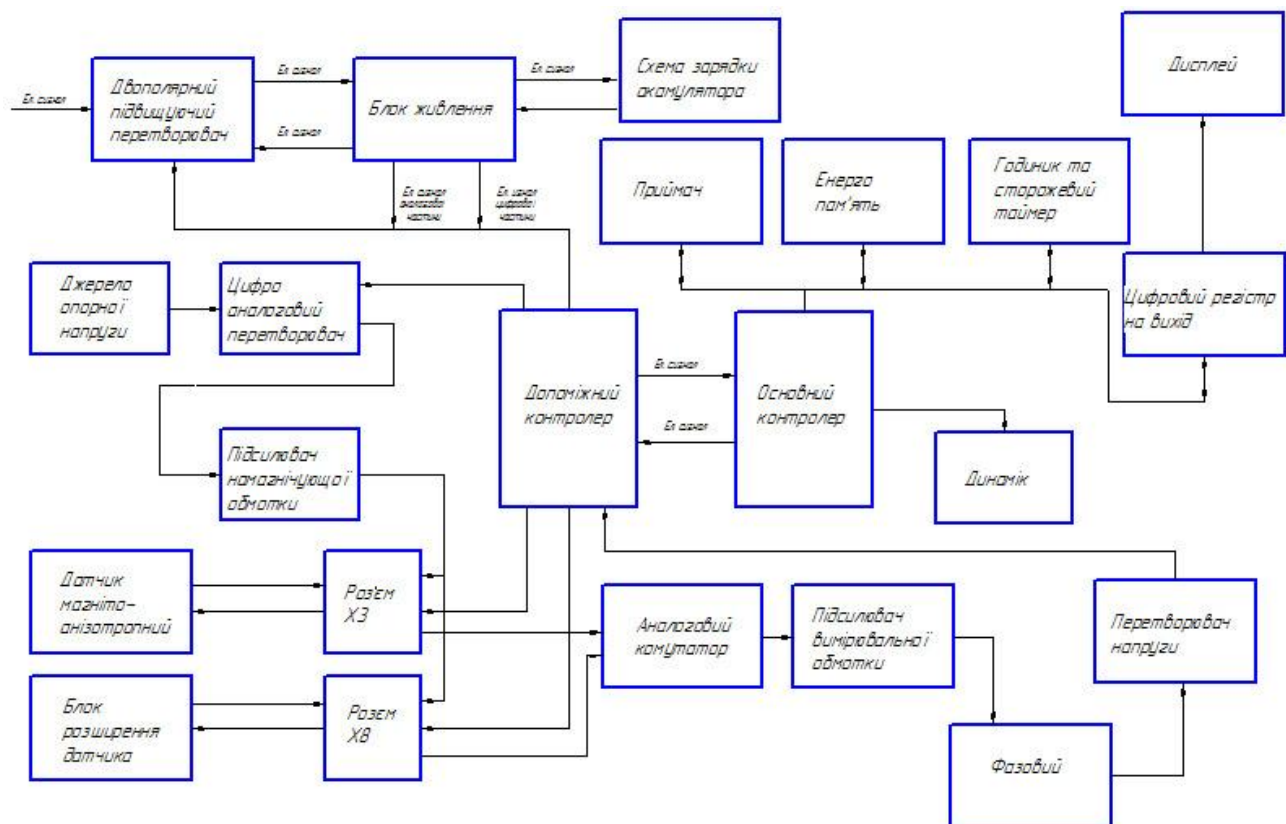


Рис. 4.4 Функціональна схема модуля вимірювання та обробки сигналів

4.2.3 Компоновка приладу MESTER – 501

Прилад komponується у вуглепластиковий корпус, який може приймати два положення: робоче і перенесення. Плата, промисловий комп'ютер кріпляться до металевої пластини, яка в свою чергу закріплюється в середині корпусу. Акумулятор знаходиться у нижній частині корпусу. Дисплей кріпиться у спеціально відведеному для нього місці : до кришки, яка обертається навколо своєї осі. Така компоновка (рис.4.5, 4.6) дозволяє переносити прилад в захищеному вигляді (дисплей повернуто на 180°). У робочому положенні корпус має можливість кріпитися на торсі робітника (оператора) завдяки пасам. Це дозволяє вивільнити руки оператора для можливості маніпулювання перетворювачем і утримання за елементи конструкції (рис.4.6).

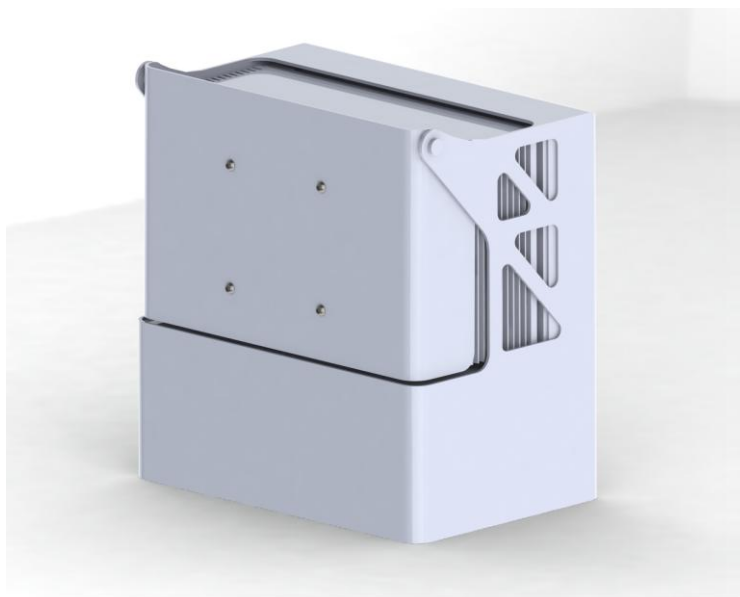


Рис. 4.5 Прилад MESTER – 501, положення перенесення

Монітор закривається (ховається) в середину, що забезпечує його безпеку при перенесенні (перевезенні).

Робоче положення - монітор оснащений стилусом, прибор кріпиться на торсі оператора за плечі і талію додатковими ремнями безпеки, як показано на рис.4.7

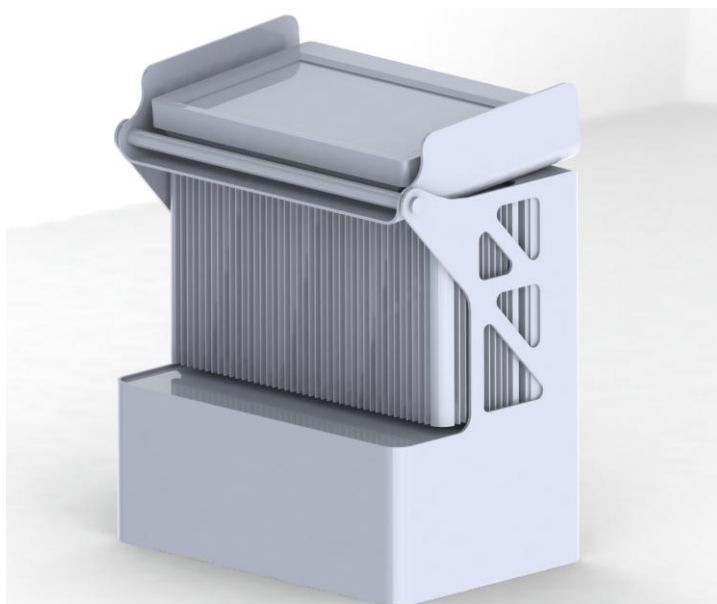


Рис. 4.6 Прилад MESTER – 501, робоче положення (монітор відкрито)

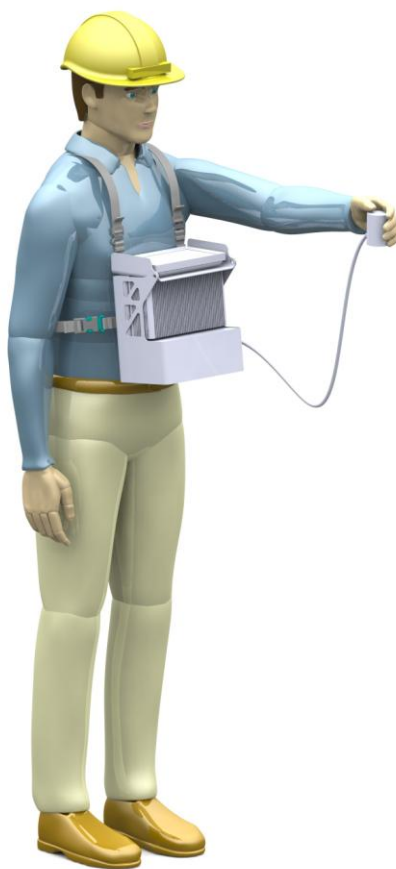


Рис 4.7 Оператор з приладом MESTER – 501

Прилад MESTER – 501 призначений для визначення напружено-деформованого стану зварних конструкцій безпосередньо на натурних об'єктах. Конструкція приладу дозволяє оператору однією рукою триматись за елементи ЗК, а другою - проводити сканування. Отримані дані оброблюються на місці в промисловому комп'ютері, зберігаються і виводяться на сенсорний екран. Корпус приладу виконано з вуглецевого композиту, що зменшує вагу приладу та збільшує його стійкість до ударів об елементи ЗК.

4.3 Впровадження результатів роботи

4.3.1 Впровадження результатів роботи при насуванні прогонової частини при будівництві залізнично-автомобільного мосту шляхом насування його через річку Дніпро

Результати роботи впроваджені під час виконання теми «Експериментальне дослідження напружень в зварних секціях залізнично-автомобільного мосту під час монтажу шляхом насування його через р. Дніпро» (додаток А). Відповідно до теми проводили дослідження напружень та деформацій в зварних секціях мосту (прогонової споруди).

Для будівництва мосту було насипано острів посередині русла річки Дніпро. На острові було побудовано платформу для складання секцій. Після складання прогонова споруда довжиною до 106 м насувалась на сусідню опору мосту. Велика вага споруди (до 1000 т) і консольний виліт призводили до значних напружень. Насування ускладнювалось тим, що висота стінок коробчастих секцій (3.2x2.2 м) не була однаковою. Це призводило до того, що споруда із 2 секцій (рис. 4.8, 4.9, 4.10) опиралися 2-ма вертикальними стінками замість 4-ох на перекаточні пристрої (рис. 4.11).



Рис. 4.8. Секції моста через річку Дніпро



Рис. 4.9. Вигляд внутрішньої частини секції моста через річку Дніпро



Рис.4.10. Вигляд внутрішньої частини однієї стінки секції моста через річку Дніпро



Рис. 4.11 Вимірювання напружень на перекаточному пристрої

Визначення напружень проводили у місцях до переكاتочного пристрою, на ньому та за ним. Для цього перетворювач доповнили спеціальним магнітним кріпленням (рис.4.12).

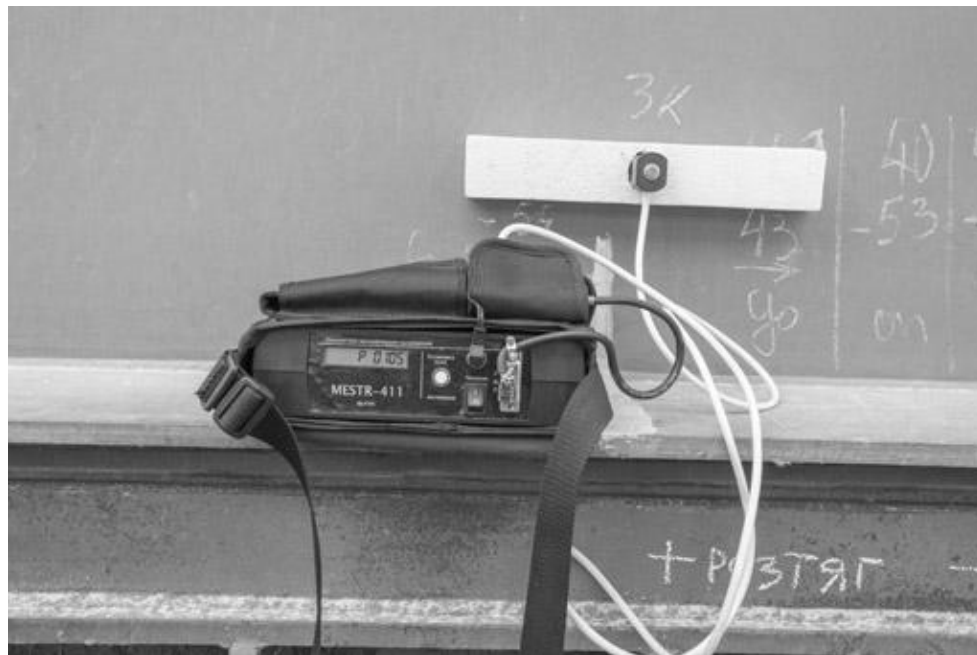


Рис. 4.12 Прилад MESTR-411 та перетворювач на стінці секції моста

Перетворювачі встановлювали на кожну із 4-х вертикальних стінок секцій (рис. 4.13, 4.14) та періодично (в час технологічних пауз) знімали покази.



Рис.4.13. Встановлення перетворювача на стінку С



Рис. 4.14. Встановлення перетворювача на стінку В

Визначення напружень у зварних секціях прогонової споруди дозволили проводити оперативні дії для вирівнювання напружень у всіх стінках та провести успішне насування її із стапелю на опори.

4.3.2 Впровадження в УДП «Укрхімтрансміак»

Результати роботи впроваджені під час виконання теми «Оцінка напруженого стану судноперевантажувача СП-7.3» (додаток Б). Відповідно до теми проводили дослідження напружень та деформацій в зварних секціях перевантажувача (рис. 4.15)

Судноавантажувач експлуатувався 30 років в умовах морського клімату, що спричинило корозію елементів конструкції. Ставилось завдання – дослідити напружено-деформований стан та зробити висновок щодо можливості подальшого експлуатування судноавантажувача.

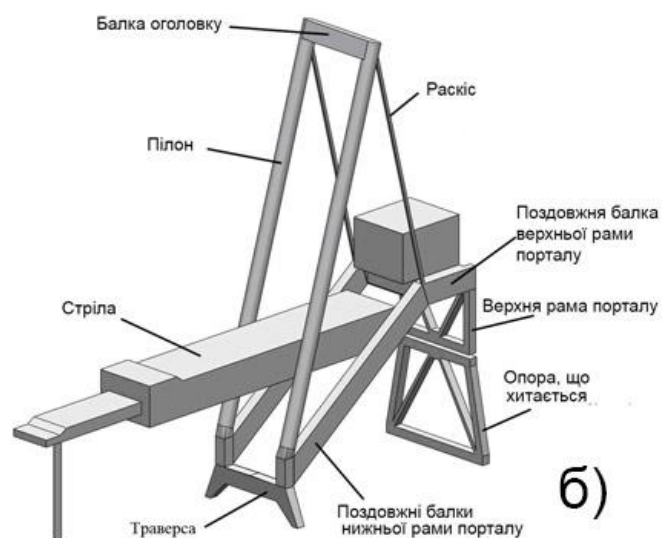
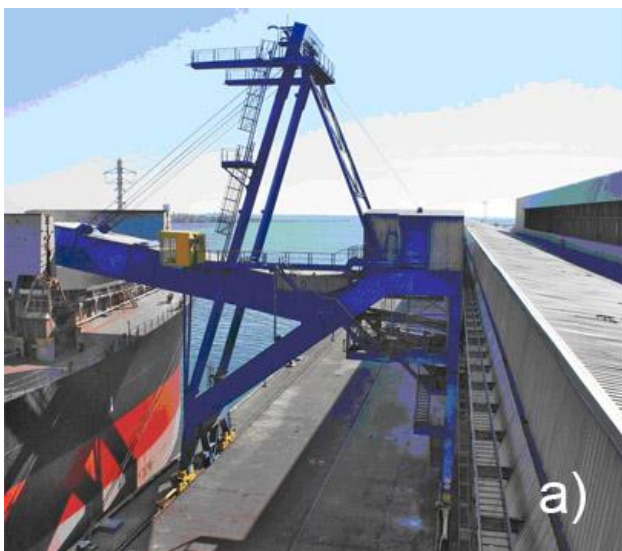


Рис. 4.15 Суднонавантажувач (а) і його схема (б)

Вимірювання напружень проводили на всіх зварних елементах конструкції суднонавантажувача : стрілі, траверсі, нижній рамі порталу, верхній рамі порталу, опорі, що хитається, розкосах, пілонах, балці оголовку (рис. 4.16 - 4.19). Як приклад, наведено розподіл напружень у стрілі та траверсі (рис. 4.20 - 4.26)



Рис. 4.16 Вимірювання напружень в стрілі



Рис. 4.17 Вигляд на опору, що хитається

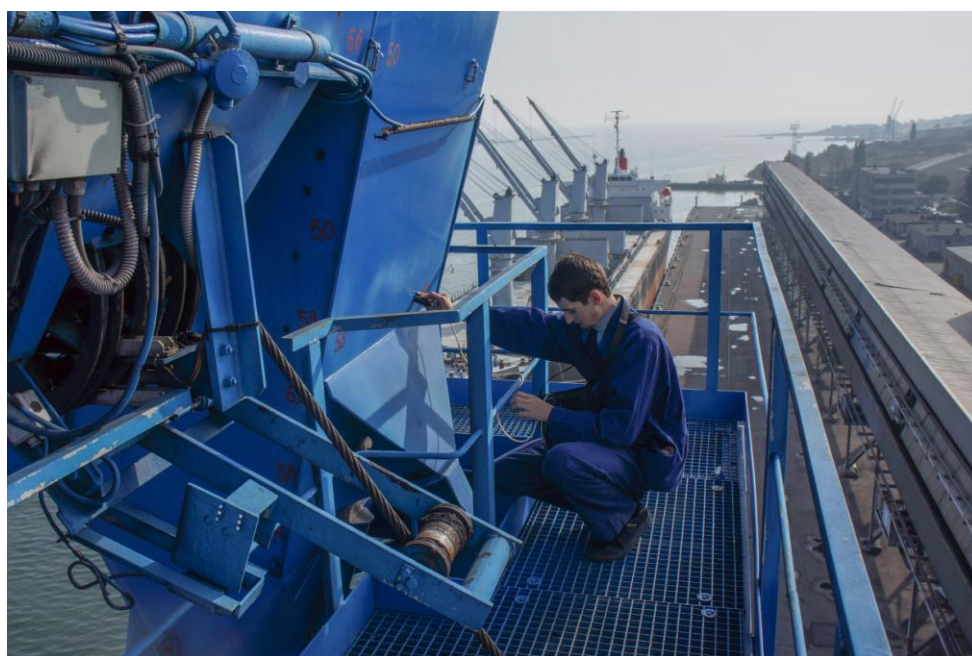


Рис. 4.18 Вимірювання напружень на оголовку суднонавантажувача

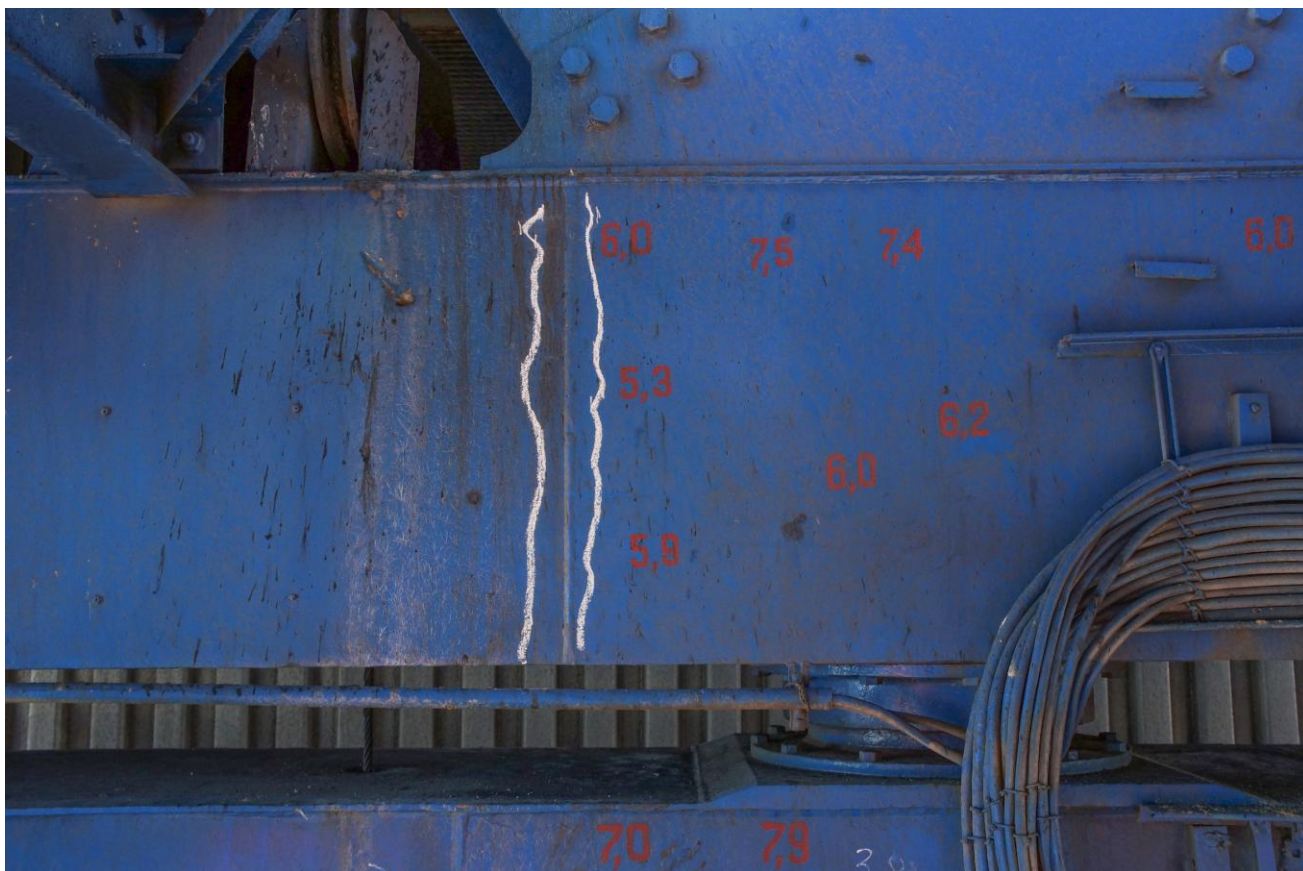


Рис.4.19 Вигляд зони розтягу зварного шва суднонавантажувача визначеного вдосконаленням електромагнітним методом

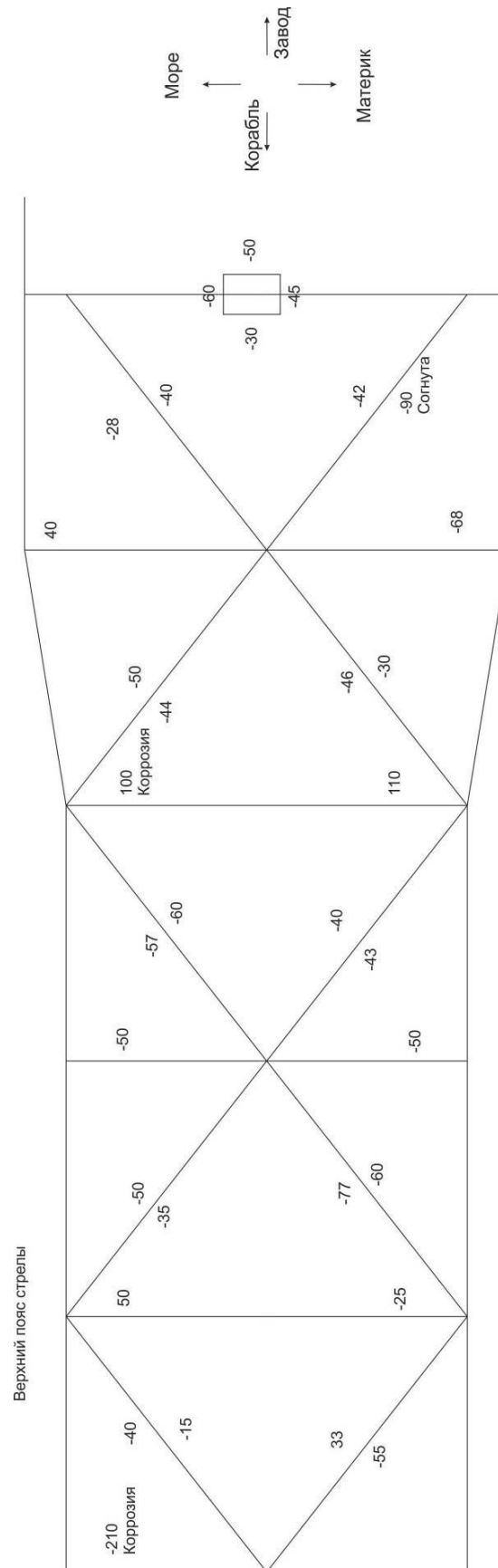


Рис. 4.20 Розподіл напружень у верхньому поясі стріли, МПа

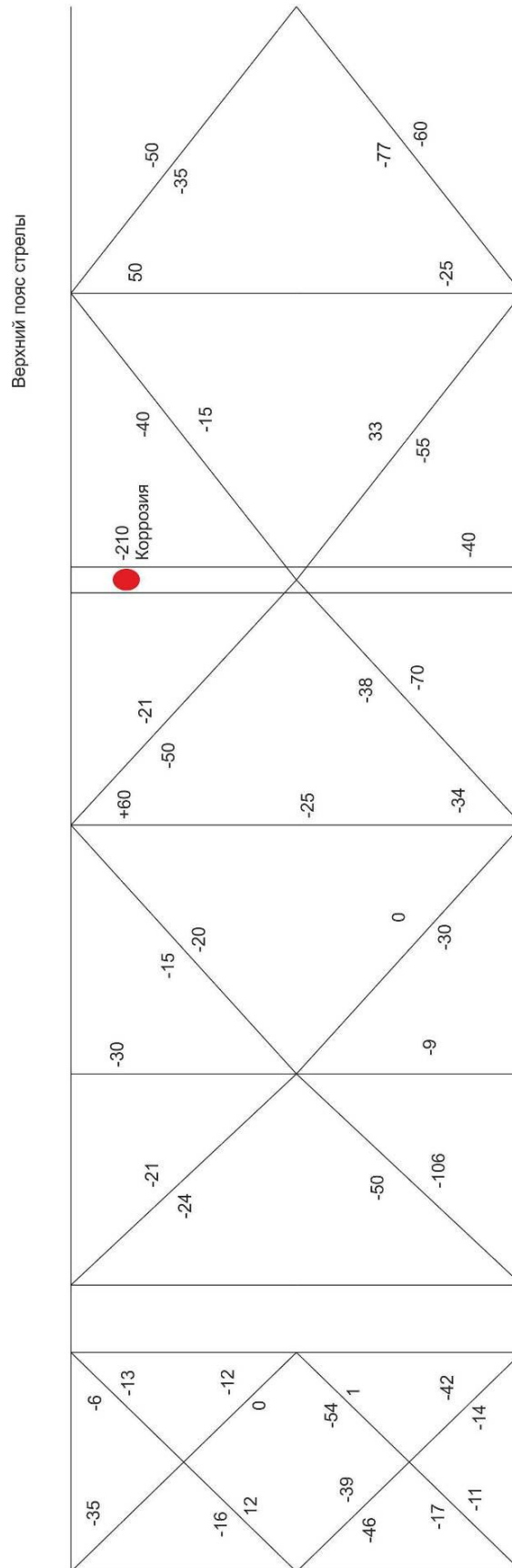


Рис. 4.21 Продовження розподілу напружень у верхньому поясі стріли, МПа

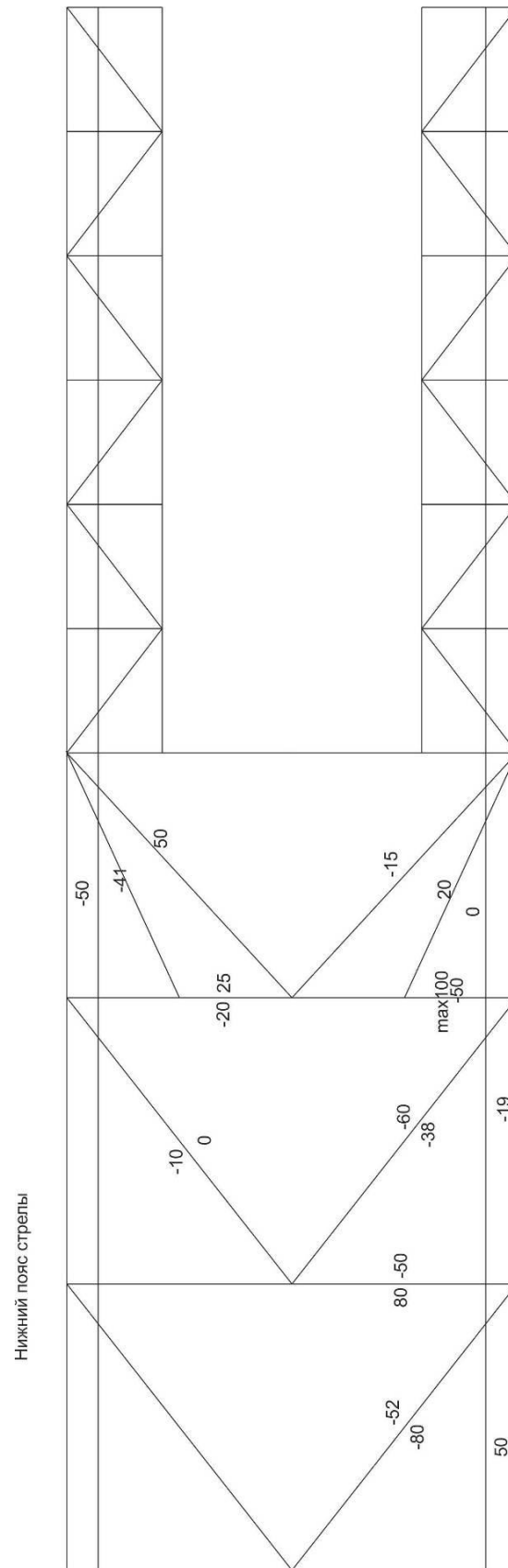


Рис. 4.23 Продовження розподілу напружень у нижньому поясі стріли, МПа

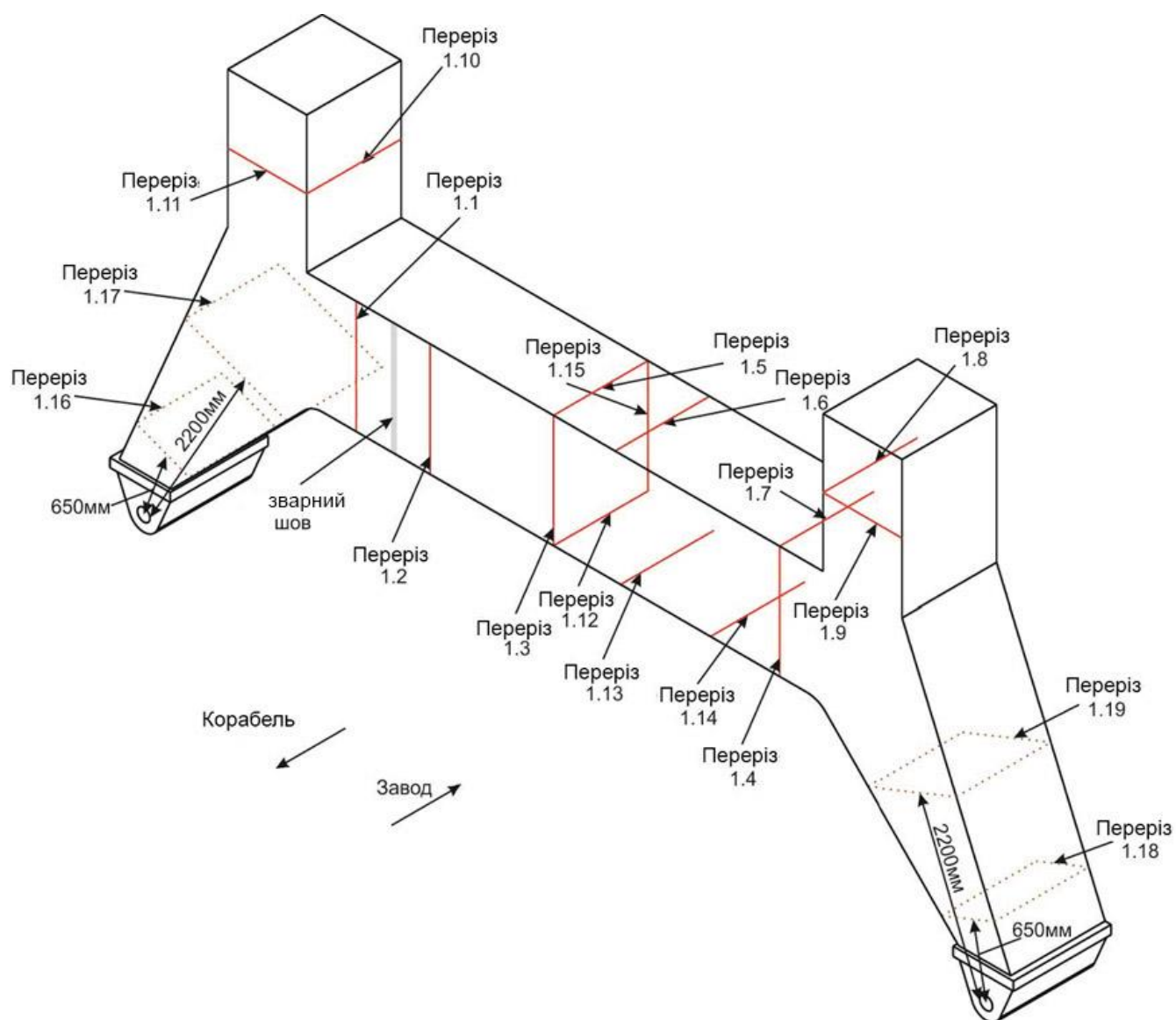


Рис. 4.24 Позначення перерізів на траверсі

Розподіл поздовжніх напружень у двох поперечних перерізах траверси показані на рис.4.25-4.26.

Після аналізу отриманих даних було зроблено висновок, що напруження не перевищують рівня половини межі текучості. Пластичних деформацій зварних елементів конструкції, за винятком зварних швів, не знайдено. Зроблено висновок про можливість подальшої експлуатації суднонавантажувача.

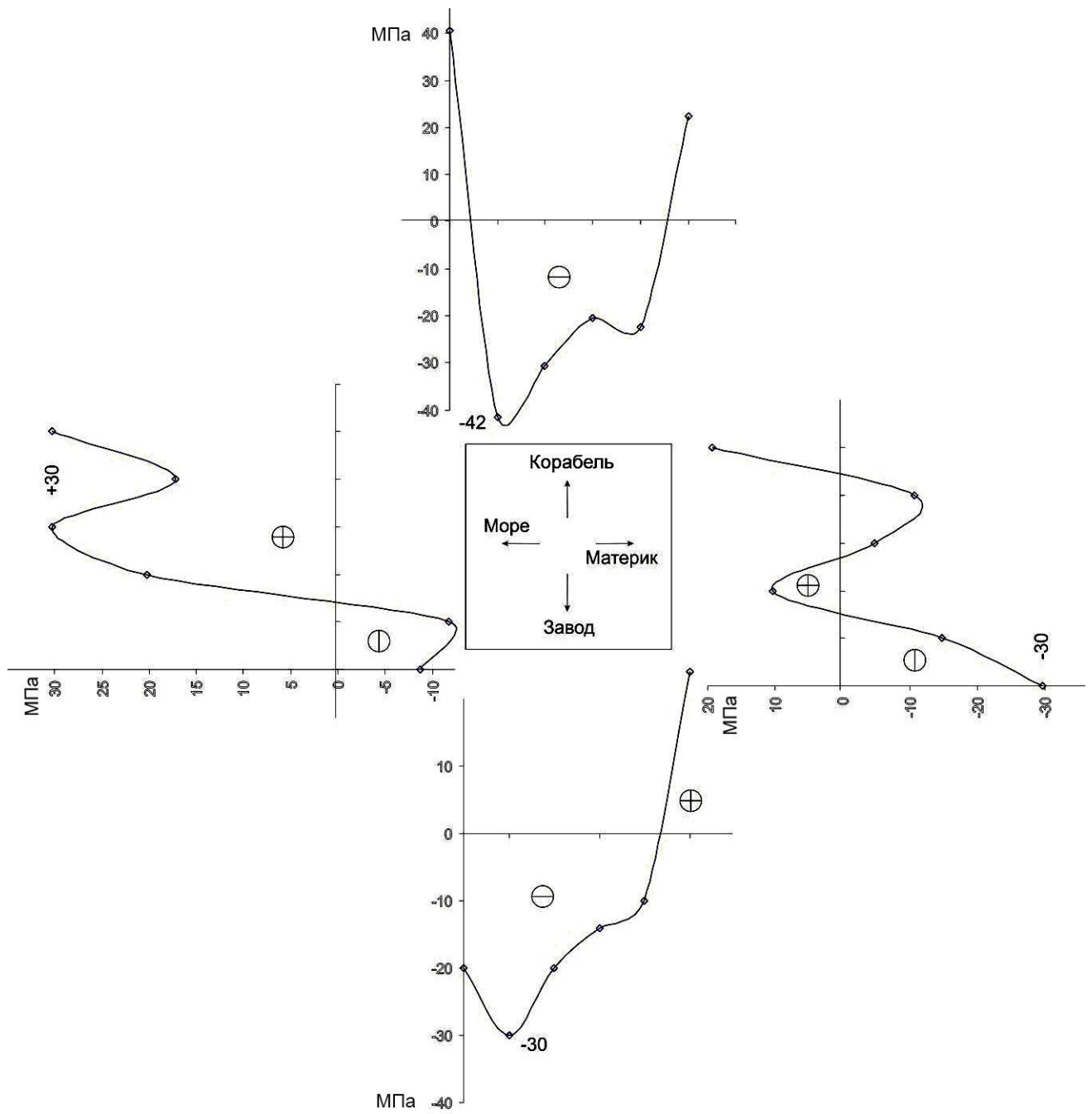


Рис. 4.25 Розподіл напружень у перерізі 1.16 траверси

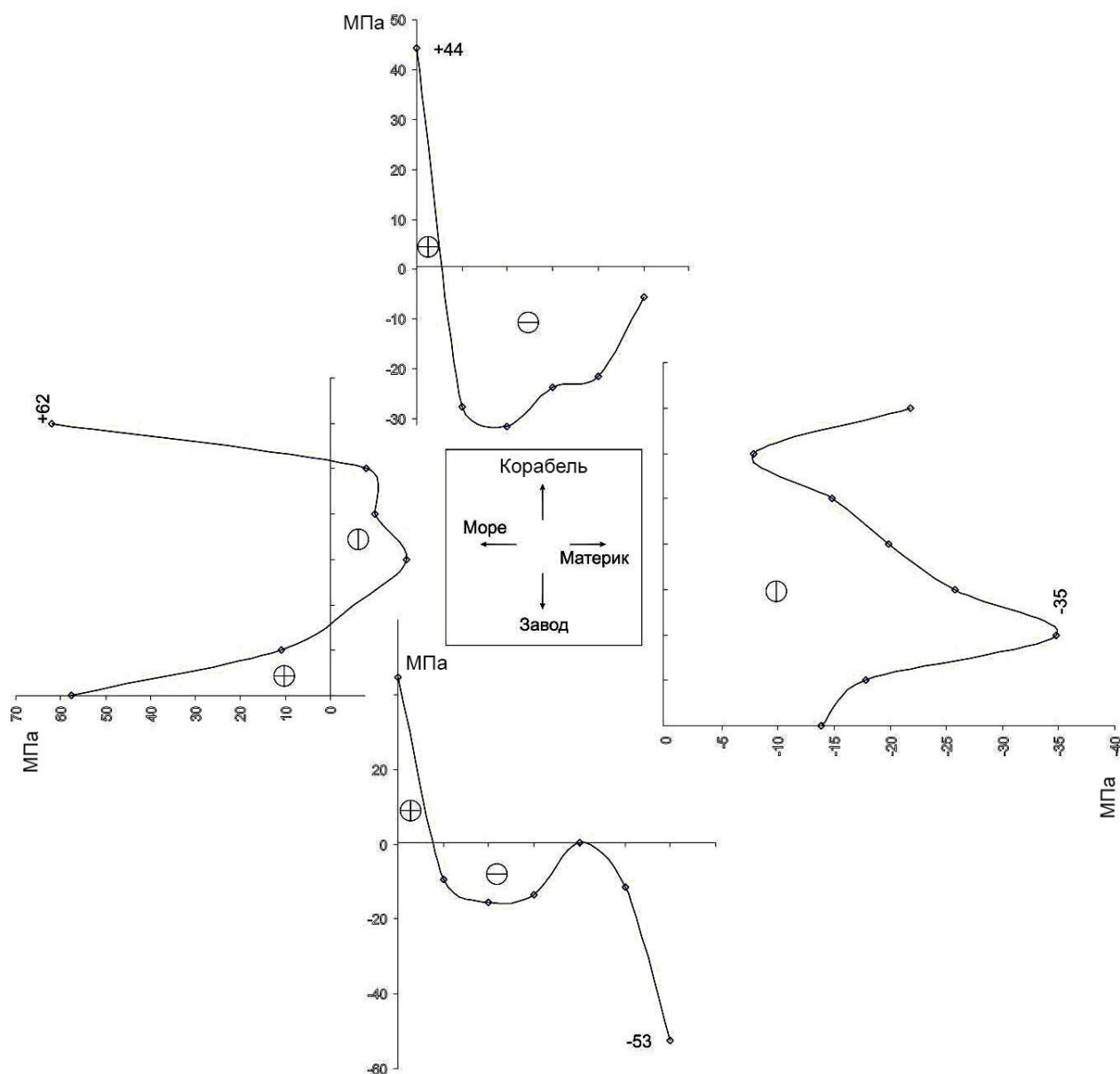


Рис. 4.26 Розподіл напружень у перерізі 1.17 траверси

4.3.3 Впровадження в учбовий процес

Результати роботи також впроваджені в учбовий процес студентів PhD по дисципліні «Діагностика та системи забезпечення якості» (додаток В)

Висновки до розділу 4

А) Розроблено новий прилад MESTER-501 для визначення напружено-деформованого стану електромагнітним методом на натурних зварних конструкціях.

В) Запропоновано новий комбінований перетворювач у двох варіантах для визначення гармонійних складових сигналу магнітоанізотропного перетворювача та параметрів петлі магнітного гістерезису.

С) Впроваджено результати роботи при насуванні прогонової частини при будівництві залізнично-автомобільного мосту шляхом насування його через річку Дніпро, на об'єктах ДП Укрхімтрансміак та учбовому процесі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Напружено-деформований стан пластичної зони зварних з'єднань та ділянок із пластичними деформаціями розтягу може бути кількісно оцінено шляхом сумісного гармонічного аналізу сигналу 4-х полюсного магнітоанізотропного перетворювача та параметрів петлі магнітного гістерезису.

2. Для визначення ступеню пластичного деформування стиснення у пластичній зоні зварних з'єднань електромагнітним методом доцільно використовувати B - половину перетину петлі гістерезису по осі індукції та H_{max} - половину максимальної ширини петлі гістерезису по осі напруженості магнітного поля.

3. Для визначення напружень у пластичній зоні зварних з'єднань електромагнітним методом доцільно використовувати амплітуди першої A_1 , третьої A_3 та шостої A_6 гармонік.

4. Для визначення ступеню пластичного деформування у ділянках із пластичними деформаціями розтягу доцільно застосовувати B_{max} – половину максимальної висоти петлі магнітного гістерезису по осі індукції петлі гістерезису.

5. Для визначення напружень у ділянках із пластичними деформаціями розтягу доцільно використовувати фазу першої гармоніки A_1 сигналу магнітоанізотропного перетворювача.

6. Розроблений прилад MESTR-501 має характеристики, які дозволяють із достатньою точністю визначити напружено-деформований стан на натурних зварних конструкціях електромагнітним методом.

7. Визначення гармонійних складових сигналу магнітоанізотропного перетворювача та параметрів петлі магнітного гістерезису забезпечується розробленим новим комбінованим перетворювачом у двох варіантах.

8. Проведена перевірка розробленого обладнання при будівництві залізнично-автомобільного мосту шляхом насування його через річку Дніпро, та на об'єктах ДП Укрхімтрансміаєк свідчить про доцільність його використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 . Промисловість України/ [Електронний ресурс] / Промисловість України // Вікіпедія. Режим доступу
http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8

2. Фомичев С.К. Автономная система мониторинга механических напряжений магистральных трубопроводов с использованием возможностей GSM связи/ С.К. Фомичев, С.Н. Минаков, М.А. Яременко, С.В. Михалко, А.В. Данильчик, А.С. Минаков //Техн. диагностика и неразруш. контроль. - 2008. - №1. – С. 9-12.

3. Фомичев С.К. Определение силовых воздействий на трубопровод по анализу эпюр распределения продольных напряжений / С.К. Фомичев, С.Н. Минаков, С.В. Михалко, М.А. Яременко, А.С. Минаков. //Техн. диагностика и неразруш. контроль. - 2009. - №2. – С. 11-14.

4. Фомичев С.К. Сбор, накопление и визуализация данных мониторинга напряженного состояния магистральных трубопроводов/ С.К. Фомичев, А.Е. Пирумов, С.Н. Минаков, А.С. Минаков, А.В. Данильчик, С.В. Михалко, М.А. Яременко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, К., 2012, № 1, С. 49-52.

5. Фомичев С.К. Обработка данных в системе мониторинга напряженного состояния магистральных трубопроводов / С.К. Фомичев, А.Е. Пирумов, С.Н. Минаков, А.С. Минаков, О.Л. Бабенко, В.А. Верпета, А.И. Евтухов // Технологические системы. – 2012. – №2(59). С.81-84.

6. Bastun Vladimir Monitoring of the technical state of a linear part of main pipelines by nondestructive express control methods / Vladimir Bastun, Elena Bespalova, Galina Urusova, Anton Minakov// Journal of Control Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 2, April 2014, Pages 141-146. (*іноземне видання*)

7. MONITORING OF TECHNICAL STATE OF TECHNOGENIC UNSAFE PIPELINES /S. Fomichov, S. Minakov, A. Minakov, A. Pirumov, M. Shevchenko, Ie. Chvertko, O. Vovk // Наукоємні технології, № 2 (34), 2017, С.171-177.

8. Pirumov Andriy Application of Reverse Magnetization Method of Evaluating Stresses in Welded Structures / Andriy Pirumov, Mykola Shvevchenko, Anton Minakov, Sergiy Minakov, Yevgenia Chvertko // Journal of Materials Science and Technology (Bulgary) 2015, Vol. 23, No. 4, pp. 295–302. *(іноземне видання)*

9. Патент на корисну модель 100379 України. МПК G01L1/12, G01N27/72. Спосіб комплексного електромагнітного контролю структурного і напружено-деформованого стану феромагнітних матеріалів / В.М. Учанін, О.П. Осташ, С.М. Мінаков, Г.Я.Безлюдько, А.С.Мінаков - № u 2015 00420. Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

10. Патент на корисну модель України. МПК G01L1/12, G01N 27/72, G01R33/00 № UA 100405 U. Електромагнітний перетворювач для комплексного контролю структурного і напружено-деформованого стану матеріалу конструкцій із феромагнітних сталей / В.М. Учанін, С.М. Мінаков, А.С. Мінаков, М.В. Сидоренко. Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

11. Патент на корисну модель України. МПК E01D 21/06, G01N 27/83 № UA 116454 U. Спосіб поздовжнього насування пролітної конструкції під час будівництва мостів / В.М. Учанін, С.К. Фомичов, С.М. Мінаков, А.С. Мінаков, Б.О. Бобін. Опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.

12. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справ. пособие // авт. кол. : Б.С.Касаткин, А.Б.Кудрин, Л.М.Лобанов и др./ –Киев : Наук.думка, -1981. -584 с.

13. Гедрович А.И. Пластическая деформация при сварке: монография. Изд-е 2-е, перераб./ А.И. Гедрович.- Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2012.- 210с.

14. Гривняк И. Свариваемость сталей. М. машиностроение. 1984. 215 с.

15. Котрел А. Теория дислокацій/ А. Котрел. – М. мир. 1969 – 96 с.
16. ДСТУ ISO 3834.1-2001 Вимоги до якості зварювання. Зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 1. Настанови щодо вибирання та застосовування.
17. Сагалевич В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений/ В.М. Сагалевич – М. Машиностроение. 1974.-248с.
18. Патон Б.Е. Обоснование методов обследования и выбор мест шурфовки магистральных газопроводов / Б.Е. Патон, А.Я. Недосека, С.К. Фомичев, М.А. Яременко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1999. - №1. - С.3-12.
19. Сунагатов М.Ф. Стесс-коррозия магистральных газопроводов/ [Електронний ресурс] / М.Ф. Сунагатов // Безопасность труда в промышленности. -2011. -№9. Режим доступа <http://www.safeprom.ru/articles/detail.php?ID=15248>
20. Патон Б.Е. Обоснование методов обследования и выбор мест шурфовки магистральных газопроводов / Б.Е. Патон, А.Я. Недосека, С.К. Фомичев, М.А. Яременко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1999. - №1. - С.3-12.
21. Лебедев А.А. Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов/ А.А. Лебедев, С.А. Недосека, Н.Р. Музыка, Н.Л. Волчек // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2003. – №2. – С. 3-8.
22. Доценко Е.Р. Дослідження методу визначення напруження плинності конструкцій сталей за визначенням їх питомого опору//Методи та прилади контролю якості. -2010. -№24. – С.105-111.
23. Розгонюк В.В. Розробка концепції дослідження технічного стану надземних ділянок газонафтопроводів / В.В. Розгонюк, Л.С. Шлапак // Нафтова і газова промисловість. - 1996. - № 4. - С. 35 - 37.

24. Розгонюк В.В. Науково-технічне забезпечення моніторингу корозійного стану магістральних трубопроводів / В.В. Розгонюк, В.М. Коваль, Л.С. Шлапак // Нафтова і газова промисловість. - 1998. - № 4. – С.36 – 37.

25. Шлапак Л.С. Дослідження напружено-деформованого стану газопроводу під час капітального ремонту / Л.С. Шлапак, В.В. Розгонюк // Нафтова і газова промисловість. - 1998. - № 3. - С. 37.

26. Винокуров В.А. Влияние пластических деформаций и остаточных напряжений на сопротивляемость сталей разрушениям при пониженных температурах / В.А. Винокуров, М.Н. Скурихин // Автоматическая сварка. -1967.-№ 4.- С.1-5.

27. Копельман Л. А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению/ Л. А . Копельман -Л.: Машиностроение, 1978. - 232 с.

28. Гиренко В.С. Влияние остаточных напряжений и деформационного старения на сопротивляемость стали образованию хрупких трещин / В.С. Гиренко, Э.В. Котенко // Автоматическая сварка.-1968.- №2. - С. 34-37.

29. Ларионов В.П. О влиянии остаточных напряжений на хладостойкость и выносливость сварных соединений / В.П. Ларионов, В.Г. Петушков, Г.П. Яковлев // Проблемы прочности. -1989.-№ 7.- С. 53-57.

30. Дмитриев В.В. Влияние ремонтной сварки на механические свойства сварных соединений листов стенки резервуара [Електронний ресурс] /В.В. Дмитриев, Н.С. Местников Н.С.//Ресурс и диагностика материалов и конструкций, - Екатеринбург, -2011. Режим доступа <http://rus.imach.uran.ru/conf/rdmk/rdmk3.htm>

31. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений / В.И. Труфяков - Киев: Наукова думка, 1973.- 216 с.

32. Бабаев А.В. Влияние остаточных напряжений на зарождение и скорость развития усталостных трещин в сварных соединениях с непроварами/ А.В. Бабаев // Автоматическая сварка, 1977, №12. С. 30-32.

33. Бабаев А.В. Соппротивление усталости стыковых соединений с подрезами и остаточными напряжениями / А.В. Бабаев // Автоматическая сварка, 1979, №8.
34. Труфяков В.И. Влияние масштабного фактора и остаточных сварочных напряжений на скорость развития усталостных трещин/ В.И. Труфяков, П.П. Михеев, А.З. Кузьменко // Проблемы прочности. -1980. - №6. - С. 20-22, 30.
35. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. Ин-т электросварки им. Е.О.Патона; Под ред. В.И.Труфякова. - Киев: Наук, думка, -1990.- 256 с.
36. Глинка Г. Влияние формы распределения остаточных напряжений на рост усталостных трещин / Г. Глинка // Проблемы прочности. -1978. -№5. - С. 51-54.
37. Игнатьева В.С. Влияние остаточных напряжений на развитие усталостной трещины в области сварного стыкового шва / В.С. Игнатьева, Р.Р. Кулахметьев, В.В. Ларионов // Автоматическая сварка. 1985.-№1. - С.1-4.
38. Труфяков В.И., Михеев П.П., Кузьменко А.З. Влияние масштабного фактора и остаточных сварочных напряжений на скорость развития усталостных трещин // Проблемы прочности. -1980. - №6. - С. 20-22, 30.
39. Варламов Д.П. Повышение надежности магистральных газопроводов при использовании многократной внутритрубной дефектоскопии / Д.П. Варламов, В.Н. Дедешко, В.А. Канайкин, О.И. Стеклов // Автоматическая сварка. 2012. -№3. -С.28-34.
40. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения/ В.А. Винокуров – М. : Машиностроение, 1968.- 236с.
41. Сунагатов М.Ф. Стесс-коррозия магистральных газопроводов/ [Электронный ресурс] / М.Ф. Сунагатов // Безопасность труда в промышленности. -2011. -№9. Режим доступа <http://www.safeprom.ru/articles/detail.php?ID=15248>
42. Тоут А.И. Защита трубопроводов от стресс-коррозии [Электронный ресурс]/ А.И. Тоут//Потенциал. 1998. -№3-4. Режим доступа www.vniist.ru

43. Дмитриев В.В. Исследование влияния ремонтной сварки на остаточные напряжения сварных соединений стыков труб : тезисы VI Российской научно-технической конференции [Электронный ресурс] /В.В. Дмитриев, Н.И. Голиков // Механика микронеоднородных материалов и разрушение, - Екатеринбург, -2010. Режим доступа <http://book.uraic.ru/project/conf/txt/008/2010/mmp2.htm>
44. Винокуров В.А. Теория сварочных напряжений и деформаций/ В.А. Винокуров, Григорьянц А.Г. М. Машиностроение. 1984. - 280с.
45. Гедрович А.И., Жидков А.Б. Ресурсосберегающие методы регулирования деформаций и напряжений в сварных металлоконструкциях. Монография. – Луганск. Узд-во ВНУ им. В. Даля, 2003. - 96 с.
46. Каравайченко М.Г. Влияние пластической деформации на структуру и механические свойства низкоуглеродистой стали и ее сварных соединений при малоцикловом нагружении/ М.Г. Каравайченко, Н.К. Ценев, В.А. Волков // Автоматическая сварка, - 1993, - №8, - С.11-18.
- 47 . Касаткин Б.С. Напряжения и деформации при сварке/ Б.С. Касаткин, В.М. Прохоренко, И.М. Чертов. – 1987. - 246 с.
48. Лобанов Л.М. Сварные строительные конструкции. //Том 2. Основы проектирования конструкций. Киев: Наукова думка. 1997 г.
49. Проблемы определения ресурса сварных конструкций : обзор / Ю.К. Бондаренко, Я.М. Фурман, А.Ю. Бондаренко, О.В. Коваль // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2005. - № 1. - С.3-9.
50. Калачевский Н.Н. Магнитные шумы / Н.Н. Калачевский - М. : Наука. - 1971. - 136 с.
51. Венгринович В.Л. Байесовский подход к неразрушающему контролю напряженно-деформированного состояния / В.Л. Венгринович, Д.В. Дмитриевич // Техн. диагностика и неразруш. контроль. - 2008. - №4. – С. 45-53.

52. Yelbay I., Cam I., Gur. H. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldment by Magnetic Barkhausen Noise technique // NDT&International, 2010, Vol. 43, P. 29-33.

53. Wang Z.D., Gu Y., Wang Y.S. A review of three magnetic NDT technologies. - JMMM, 2012, V. 324, Issue 4, p. 382–388

54. Force transducers based on the stress dependence of coercive force// AIP Journal of Applied Physics/ [Електронний ресурс] / Режим доступу <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.353619>

55. The Effect of Plastic Deformation on the Coercive Force and Initial Permeability of Nickel Single Crystals/ [Електронний ресурс] / Shigeyuki Hayashi, Takasi Huzimura. Режим доступу https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans1960/5/2/5_2_127/_pdf

56. M. J. Sablik, S.W. Rubin, L. A. Riley, et al., “A Model for Hysteretic Magnetic Properties under the Application of Noncoaxial Stress and Field,” J. Appl. Phys. 74(1), 480–488 (1993).

57. V. G. Kuleev and E. S. Gorkunov, “Mechanisms of the Effect of Internal and External Stresses on the Coercive Force of Ferromagnetic Steels,” Defektoskopiya, No. 11, 3–18 (1997).

58. Неруйнівний контроль і технічна діагностика. Т. 5/ Під ред.. З.Т. Назарчука. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка, 2001. -1134 с.

59. Бахарев М.С. Разработка методов измерения механических напряжений на основе обратимых и квазиобратимых магнитоупругих явлений : автореферат дис. на соискание уч. степени доктора технических наук: спец. 05.11.13 «приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» / М.С. Бахарев. - Томский политехн. унив-т - Томск, 2004. - 45с.

60. Смолина А.А. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ КОЭРЦИОМЕТРИИ [Електронний ресурс] / А.А. Смолина, А.А. Погорелов, Н.А.Богун // УкрНИИТМ, г.

Днепропетровск. Режим доступа http://www.nio-51.com/wp-content/uploads/2011/02/article_4.pdf

61. Кулеев В.Г. Механизмы влияния внутренних и внешних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей / В.Г. Кулеев, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. – 1997. - №11. – С.3-18.

62. Захаров В.А. Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном растяжении материала / В.А. Захаров, А.И. Ульянов, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. – 2011. - №6. – С.3-15.

63. Захаров В.А. Закономерности изменения коэрцитивной силы при двухосном асимметричном деформировании стали Ст.3 / В.А. Захаров, А.И. Ульянов, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. – 2010. - №3. – С.53-69.

64. Новиков В.Ф. Влияние упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей / В.Ф. Новиков, В.А. Захаров, А.И. Ульянов, С.В. Сорокина, М.Е. Кудряшов// Дефектоскопия. – 2010. - №7. – С.57-68.

65. Бердник М.М. исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей/ М.М. Бердник, Ю.В. Александров, Р.В. Агинеи //Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2010. - №3.

66. Бердник М.М. Влияние растягивающих пластических деформаций на остаточную намагниченность и начальную проницаемость малоуглеродистых сталей/ М.М. Бердник, Ю.В. Александров, Р.В. Агинеи // Наука в нефтяной и газовой промышленности. - 2010. - №3. - С.2-6.

67. Кулеев В.Г. Особенности поведения коэрцитивной силы пластически деформированных малоуглеродистых сталей / В.Г. Кулеев, Т.П. Царькова, А.П. Ничипорук// Дефектоскопия. – 2005. - №5. – С.24-38.

68. Мужичкий В.Ф. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением/ В.Ф. Мужичкий, Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько// Дефектоскопия. – 2001. - №1. –С.38-46.

69. Grigorov G.V. Forecasting the remaining available resource of the metallic bearing structure of the bridge-cranes used over the standard operating time/ G.V. Grigorov, S.A. Gubskiy, V.V. Strijak, D.A. Ivchenko, A.A. Borisenko //Annals of the University of Petrosani, Mechanical Engineering. -10(2008). P.59-72.

70. Контроль усталости металла неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом как объективная первооснова диагностики оборудования и конструкций [Текст] / Г. Я. Безлюдько, Е. И. Елкина, Р. Н. Соломаха // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2009. - № 1. - С. 49-50.

71. Использование коэрцитивной силы для оценки технического состояния конструкций, работающих под давлением [Текст] / В. А. Нехотящий, П. С. Юхимец, Г. Я. Безлюдько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2010. - №1. - С. 49-53.

72. Крутикова Л.А. Магнитный контроль(по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций / [Электронный ресурс] / Л.А. Крутикова, В.Ф. Мужичкий, Г.Я. Безлюдько, Б.Е. Попов. Режим доступа <http://www.snr-ndt.com.ua/statya.php>

73. Макаров П.С. Совершенствование методов магнитного контроля напряженно-деформированного состояния элементов конструкций магистральных трубопроводов: автореферат дис. на соискание уч. степени канд. технических наук: спец. 25.004.195 « Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» / П.С. Макаров - Институт проблем транспорта энергоресурсов» (ГУП «ИПТЭР»), - Уфа, 2007. – 25 с.

74. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, М28 А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко – М.: 2014. 1216 с.

75. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов / Губкин С.И. Т. 1-3. – М.: Металлургиздат, 1960-61.

76. Прохоров А.В. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) уровня накопленных усталостных повреждений при циклических нагрузках в сварных соединениях сталей 09Г2С и ВСт3сп5 [Электронный ресурс] : / А.В Прохоров // Нефтегазовое дело. – 2002. – № 1.– Режим доступа до журн. <http://www.ogbus.ru/authors/Prokhorov/prokh1.pdf>

77. Гамидулин М. Метод магнитного контроля и оценки остаточного ресурса элементов маталлокнструкций буровых установок [Электронный ресурс] : / М. Гамидулин, В. Прохоров, Р. Загидулин, Т. Загидулин // ТехНАДЗОР. – 2011. – № 2 (51).– Режим доступа до журн. http://www.tnadzor.ru//project/tn/art/tn_51_2011_26.php

78. Бердник М.М. развитие метода оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла: автореферат дис. на соискание уч. степени канд. технических наук: спец. 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» / М.М. Бердник. -Утинский гос.технический унив-т - Ухта, 2010. - 23с.

79. Кулеев В.Г. Влияние растягивающих пластических деформаций на остаточную намагниченность и начальную проницаемость малоуглеродистых талей/ В.Г. Кулеев, Т.П. Царькова, А.П. Ничипорук // Дефектоскопия. -2006. - №4.- с.61-74.

80. Балина О.В. Влияние малоциклового нагружения на структуру и свойства низколегированных трубных сталей: автореферат дис. на соискание уч. степени канд. технических наук: спец. 05.02.01 « Материаловедение (машиностроение)» / О.В. Балина - -Тюменский гос. нефтегазовый унив-т - Тюмень, 2008. – 20 с.

81. Мойсейчик А.Е. Контроль усилий в стальных элементах коэрцитиметром КИПФ-1/ А.Е. Мойсейчик // Неразрушающий контроль и диагностика. -2010. - №3. - С.15-20.

82. Горкунов Э.С Влияние растягивающих пластических деформаций на остаточную намагниченность и начальную проницаемость малоуглеродистых сталей/ Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Соловьев К.Е., Задворкин С.М. // Дефектоскопия. - 2009. - №8. - С.3-9.

83. Горкунов Э.С. Оценка внутренних напряжений в трубной стали контролируемой прокатки группы прочности Х70 [Электронный ресурс] / Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Шершнева Л.С. //Ресурс и диагностика материалов и конструкций, - Екатеринбург,- 2011. Режим доступа book.uraic.ru/project/175-Шершнева-24.04.09.doc

84. Dapino M. J., A MAGNETOELASTIC MODEL FOR VILLARI-EFFECT MAGNETOSTRICTIVE SENSORS / M. J. Dapino R. C. Smith F. T. Calkins A. B. Flatau// Non Paid ADAS , Technical report, 2002 Режим доступа <http://www.ncsu.edu/crsc/reports/ftp/pdf/crsc-tr02-20.pdf>

85. Белокур И.П. К вопросу сертификации персонала по неразрушающему контролю деградации материала металлоконструкций/ И.П. Белокур, Ю.О. Гордонная // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2013. - № 4. - С. 47-55.

86. Горкунов Э. С. Определение магнитных свойств отдельных зон сварного соединения и ширины сварного шва по магнитным измерениям/ Э. С. Горкунов, А.М. Поволоцкая, Е.А. Туева, Л.С. Горулева, С.М. Задворкин //Дефектоскопия. - 2011. - №9. - С.3-16

87. Бондаренко А.Ю. Магнітний коерцитиметричний контроль технічного стану зварних з'єднань: автореферат дис. на здобуття наук. ступеню канд. техн. наук: спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» /

А.Ю. Бондаренко. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу – Івано-Франківськ, 207. -21с.

88. Patent US 6345534 B1. NONDESTRUCTIVE FATIGUE TEST METHOD FOR FERROMAGNETIC CONSTRUCTION MATERIALS/ Seiki Takahashi; Iwate University, Iwate Pref. (JP); Date of Patent Feb. 12,2002.

89. Patent US 6424149 B1. NONDESTRUCTIVE FATIGUE TEST METHOD FOR FERROMAGNETIC CONSTRUCTION MATERIALS / Seiki Takahashi; Iwate University, Morioka (JP); Date of Patent Jul. 23,2002.

90. Захаров В. А. Закономерности измерения коэрцитивной силы при двухосном асимметричном деформировании стали Ст3/ В. А. Захаров, А.И. Ульянов, Э.С. Горкунов// Дефектоскопия. - 2010. - №3. - С.55-68.

91. Новиков В. Ф. Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей/ В. Ф. Новиков, В. А. Захаров, А.И. Ульянов, С.В. Сорокина, М.Е. Кудряшов// Дефектоскопия. -2010. - №7. - С.59-68.

92. Захаров В. А. Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала/ В. А. Захаров, А.И. Ульянов, Э.С. Горкунов// Дефектоскопия. -2011. - №6. - С.3-15.

93. Ибрагимов И.Г., Вильданов Р.Г. О возможности измерения напряжений в сварных швах методом потерь перемагничивания // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2005. №1.URL: http://ogbus.ru/authors/Ibragimov/Ibragimov_1.pdf

94. Ибрагимов И.Г., Вильданов Р.Г. О возможности измерения напряжений в сварных швах методом потерь перемагничивания // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2005. №1. URL: http://ogbus.ru/authors/Ibragimov/Ibragimov_1.pdf

95. Михеев М.Н. О контроле качества термообработки стальных изделий по потерям на перемагничивание/ М.Н. Михеев // Дефектоскопия. -1986.- №4.- С.74-77.

96. Улыбин А.В. применение резистивного электроконтактного метода для мониторинга мониторинга состояния стальных конструкций/ Улыбин А.В. // Инженерно-строительный журнал. -2010. - №7. - С.21-24.

97. Патент Украина №106168 UA МПК G01N27/90. Вихрострумовий спосіб визначення локальної деградації конструкційних матеріалів під час довготривалої експлуатації/ О.П. Осташ, В.М. Учанін, І.М. Андрейко, Ю.В. Головатюк, Л.Б. Ковальчук. Опубл. 25.07.2014. Бюл. №14.

98. Дубов А.А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: учебное пособие/ А.А. Дубов, А.А. Дубов, С.М. Колокольников -М. : ЗАО "ТИССО". -2006. - 332 с.

99. Власов В.Т. Физическая теория процесса "деформация - разрушение". Часть I. Физические критерии предельных состояний металла/ В.Т. Власов, А.А. Дубов -М. : ЗАО "ТИССО". - 2007. - 517 с.

100. Мирошников В.В. Контроль упругих напряжений по величине остаточной намагниченности металла/ В.В. Мирошников, О.П. Завальнюк// Матеріали 7-ї національної науково-технічної конференції і виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», Київ, 20-23 листопада 2012. С.84-86.

101. Craik D.J., Wood M.J. Magnetisation changes induced by stresses in a constant applied field. – J. Appl. Phys. – 1970. – № 3. – PP. 1009-1016.

102 . Dobmann G. Non-Destructive Testing for Ageing Management of Nuclear Power Components // Nuclear Power - Control, Reliability and Human Factors, book edited by Pavel Tsvetkov, Texas A&M University, USA, 2011, p.311-338.

103. Шарипкулова Айгуль Тимирьяновна. Разработка метода оценки предельного состояния металла технологических трубопроводов по электромагнитным параметрам : автореферат дис. кандидата технических наук :

05.26.03, 05.02.01 / Шарипкулова Айгуль Тимирьяновна; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т] - Уфа, 2009 - Количество страниц: 23 с. Уфа, 2009. 23 с.

104. Бида Г. В. Многопараметровые методы в магнитной структуроскопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей / Г. В. Бида, А.П. Ничипорук //Дефектоскопия. - 2007. - №8. - С.3-24.

105. Карпаш М.О. Методологія багатопараметрового діагностування технічного стану трубопроводів довготривалої експлуатації / М.О. Карпаш // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2013. - № 3. - С. 23-30

106. Карпаш М.О. Розвиток методів, засобів та технологій багатопараметрового контролю технічного стану магістральних трубопроводів: автореферат дис. на здобуття наук. ступеню доктора техн. наук: спец. 05.15.13 «Трубопровідний транспорт» / М.О. Карпаш. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу – Івано-Франківськ, 2013. – 34 с.

107. Карпаш А.М. Удосконалення методу визначення напруженого стану трубопроводів та посудин, що працюють під тиском / А.М. Карпаш, Н.Л. Тацакович, М.О. Карпаш // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2017. - № 2. - С. 9-16.

108. Industrial application of neural nrtworks – an investigation/ B.Lennox, G.A.Montague, A.M.Frith et al. // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2002. Vol. 16. – Issue 4. –P.487-546.

109. Multiparameter analisis of the Barkhausen noise signal and its application for the assessment of plastic deformation level in 13HMF grade steel/L.Piotowski, B.Augistyniak, M.Chmielewski, Z.Kowalewski //Measument Sci. and Technology, - 2010, -22, №12.

110. Бида Г. В. Многопараметровые методы в магнитной структуроскопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей / Г. В. Бида, А.П. Ничипорук //Дефектоскопия. - 2007. - №8. - С.3-24.

111. Titto K. Measuring stresses in rolls by magnetoelastic metod/ K. Titto //Mecahanical. - №8, - P.73-78.
112. Упругие тепловые и электрические явления в ферромагнетиках/ К.П. Белов [2-е изд. доп.] –М ГИИТЛ. -1957. - 279 с.
113. Вонсовский С.В. Влияние слабых упругих напряжений на начальную обратимую восприимчивость ферромагнетиков/ С.В. Вонсовский // ЖТЭФ. -1947. - Т. 17. - Вып.12. - С.69-73.
114. Ландау Л.Д. Теория упругости/ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц -М. : -1984. - 248 с.
115. Barton T.H. A precision torquemeter based on magnetic stress anisotropy/ T.H. Barton, P.S. Ionides // IEEE transaction on pawer apparatus and system.- 2966.- Vol. 85. - №2.
116. Ершов Р.Е. Контроль термообработки ферромагнитных изделий методом вихревых токов/ Р.Е. Ершов // Изв. вузов.Физика. -1966. - №4. - С.52-60.
117. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред/ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц -М. : Наука. -1982. - 620 с.
118. А. с. 111331 СССР , МКИ2 G01N27/86. Датчик магнитной анизотропии /Ю.Я.Мехонцев (СССР).- 2 с. : ил.
119. Сидртдинов Р.А. Исследование напряженного состояния стенки трубы с неоднородными остаточными напряжениями при изгибе / Р.А Сидртдинов, В.Б. Гейцман, В.Г. Рыбалко, Д.В. Новгородов //Дефектоскопия. -2012. -№1. -с.75-86.
120. Мінаков С.М. Визначення напруженого стану зварних магістральних трубопроводів магнітоанізотропним методом: автореферат дис.. на здобуття науков. ступеня канд. технічних наук спеціальності 05.03.06 - «Зварювання та споріднені процеси і технології»/ С.М. Мінаков. – НТУУ «КПІ»- Київ. 2012. – 23 с.
121. Патент Украина №17181А UA МКИ⁵ G011/12. Способ определения механических напряжений в изделиях из ферромагнитных материалов и устройство

для его реализации/ С.К. Фомичев, С.Н. Минаков, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, Г.А. Ланчаков, А.Н. Кульков, А.И. Степаненко, С.П. Зарицкий. Опубл. 31.10.97. Бюл. №5.

122. Учанін В.М. / Електромагнітні методи визначення напружено-деформованого стану конструкцій із феромагнітних матеріалів/ В.М. Учанін, С.М. Мінаков // Праці 8-ої нац. наук.-техн. конф. "Неруйнівний контроль та технічна діагностика". – Київ: УТ НКТД, 2016. – С. 64–70.

123. Шель М.М. Неразрушающий контроль методом высших гармоник вихревых токов / М.М. Шель //Труды ин-та/ИркутскНИИХИММАШ -1970. -вып.2. - С.97-127.

124. Шель М.М. Применение высших гармоник для измерения напряжений в металлах / М.М. Шель, В.Т. Токунов //Исследования по физике металлов и неразрушающим методам контроля. –Минск : Наука и техника. -1968. - 355 с.

125. Гусик Н.О. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы [Текст] / Н.О. Гусик, А.В. Чернышов, Н.Н. Зацепин, А.Ф. Осипов // Дефектоскопия. - 1998. - № 4. - С. 41-54.

126. Мехонцев Ю.А. Измеритель упругих напряжений. -М.: Радио, 1958. - 320с., А. с. 111331 СССР , МКИ2 G01N27/86. Датчик магнитной анизотропии /Ю.Я.Мехонцев (СССР). Бюлл. изобр. — 1961.- № 6.- 2 с. : ил.

127. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов, Киев: Наукова думка, 1988. –736 с.

128. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов / С. И. Губкин . Т.1-3. — М.: Металлургиздат, 1960-61.

129. Трочун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке / Трочун И.П. М.: Машгиз, 1964. - 248 с.

130. РУСТЕХПРОМ / [Электронный ресурс] / РУСТЕХПРОМ. Режим доступа <http://rustechprom.ru/en/product/10801/>

131. АУТОРСС / [Електронний ресурс] / АУТОРСС. Режим доступу
<http://autopc.com.ua/touchscreen-monitors/103-lilliput-869gl-80np-c-t-sensornyj-vga-dvi-hdmi-monitor-8-diujmov.html>

ДОДАТОК А

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор філії «БУ «Дніпро-міст»
ТОВ БМК «ПЛАНЕТА-МІСТ»С.С. Сукачов
«21» грудня 2009 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан зварювального факультету
НТУУ «КПІ»С.К. Фомічов
«21» грудня 2009 р.

м. Київ

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписалися, представники філії «БУ «Дніпро-міст» ТОВ БМК «ПЛАНЕТА-МІСТ» головний інженер Федоренко
Валерій Федорович

з одного боку, та представники НТУУ «КПІ» провідний інженер Бобін Б.О., науковий співробітник Мінаков С.М., магістрант Мінаков А.С. з іншого боку, склали дійсний акт про впровадження у виробництво станом на 21 грудня 2009 р. результатів пошукової науково-дослідної роботи «Експериментальне дослідження напружень в зварних секціях залізнично-автомобільного мосту під час монтажу шляхом насування його через р. Дніпро», яка була виконана співробітниками зварювального факультету НТУУ «КПІ» за період з 18 березня 2009 р. по 21 грудня 2009р..

Назва об'єкту, де було впроваджено заходи: коробчасті конструкції мостової прогонної споруди.

Вид впровадження : прилад та методика електромагнітного визначення напруженого стану зварних коробчастих конструкцій мостової прогонної споруди.

Досягнуті технічні результати: визначення механічних напружень зварних коробчастих конструкцій під час насування прогонної споруди.

Від філії «БУ «Дніпро-міст»
БМК «ПЛАНЕТА-МІСТ»

Від НТУУ «КПІ»

Бобін Б.О.
Провідний інженер
Філія БУ «Дніпро-міст»

Б.О.Бобін
Провідний інженер

Мінаков С.М.
Науковий співробітник

С.М. Мінаков
Науковий співробітник

Мінаков А.С.
Магістрант

А.С. Мінаков
Магістрант

ДОДАТОК Б

ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ
З ПИТАНЬ ТЕХНІЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ТА СПОЖИВЧОЇ
ПОЛІТИКИ



ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ
З ПРОМИСЛОВОЇ БЕЗПЕКИ,
ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ГІРНИЧОГО
НАГЛЯДУ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ТЕХНІЧНИЙ КОМІТЕТ СТАНДАРТИЗАЦІЇ УКРАЇНИ № 78

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТА НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

03150, Київ-150, МСП,
вул. Казимира Малевича, 11, ІЕЗ, корп.6

Тел.: (044) 200-66-46, 200-46-60
Факс: (044) 200-46-60, 205-25-88

№

“Затверджую”

заст. Голови технічного комітету ТК-78

“Технічна діагностика і неруйнівний контроль”

д.т.н., професор

А.Я. Недосека

“23” мая 2018 р.

Акт впровадження

результатів дисертаційної роботи на здобуття вченого ступеня к.т.н.

Мінакова А.С.

на тему “Експериментальне визначення напружено-деформованого стану
зварних з'єднань електромагнітним методом”

Цей акт складено про наступне:

1. Комплексна система моніторингу напружено-деформованого стану магістрального аміакопроводу “Тольятті-Одеса” УДП “Укрхімтрансміак” впроваджена на переходах через річку Дніпро, а/дорогу Кривий Ріг — Апостолово.
2. Апаратура для визначення напружено-деформованого стану застосовується для оцінки технічного стану “Судноперевантажувача СП-7.3” на ПАТ “Одеський припортовий завод”.

пров.н.с., д.т.н.

с.н.с., к.т.н.

с.н.с., к.ф.-м.н.



Недосека С. А.

Яременко М. А.

Бойчук О. І.

ДОДАТОК В

Затверджую
перший заступник декана
зварювального факультету
НТУУ «КПІ ім. Ігоря
Сікорського»



Бойко В.П.
«04» квітня 2018 р.

м. Київ

«04» 04 2018р.

Акт впровадження
результатів дисертаційної роботи Мінакова А.С.
на тему «Експериментальне визначення напружено-деформованого стану
зварних з'єднань електромагнітним методом»

Цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Мінакова А.С. на тему «Експериментальне визначення напружено-деформованого стану зварних з'єднань електромагнітним методом» впроваджено в учбовий процес підготовки студентів PhD по дисципліні «Діагностика та системи забезпечення якості».

Заступник декана ЗФ
з учбово-методичної роботи
к.т.н., доцент

Пірумов А.Є.